目　　录

上篇　思维科学与智能系统

中篇　开放的复杂巨系统及综合集成研讨厅体系

下篇　信息空间智慧的涌现

上　　篇

思维科学与智能系统

1 钱学森关于思维科学的论述[①]

1.1 思维科学的重要性和目的

……图论所用研究方法很分散，每一小类问题都各有千秋，统不起来，以致学者可以钻入一小类问题，不读门外书。我想这可能就是图论必须用形象思维，每一小类问题都是根据一点点形象（直感）的认识出发，加上后面抽象（逻辑）思维，大做文章，作为一小类图论的理论。但原来那一点点形象（直感）很局限，一小类也就限制死了，出不了格！因此，问题在于不知道形象（直感）思维的规律。那反过来，研究如何打通图论各类问题的理论可否成为研究对象（直感）思维的一条途径？……

我又想：我把人的主观能力分成三大块：科学技术体系，在这个体系外围的我称之为知识的东西（局部的经验总结，非马克思主义哲学为指导的学问）和文学艺术。一旦思维科学有了突破，我们就使这三大块的结构大为改观，那将是人类文明的飞跃！

所以思维科学重要！

1986 年 12 月 10 日

……我看教授先生把心理学，特别是他的认知心理学同思维学混在一起了！本来这个问题我在《自然杂志》1983 年 3 期一文中已讲清楚，认知心理学就是上升到精神学（mentalics），也还是人体科学基础学科层次，属人体科学大部门。而思维学属思维科学大部门。怎么能混在一起？

当然外国人不懂我们讲的以马克思主义哲学为最高概括的科学技术体系，头脑不清也难免！

思维学的最终目的，不仅仅是能理解人的思维行为，它要创造出比人能达到的能力更大。请看：数理逻辑和抽象思维学不是比任何一个人的推理能力强吗？

以上的原因使我更想避开 cognitive science 这个词，用 noetic science 吧。

1987 年 7 月 6 日

（1）我们要进一步分清什么是人体科学，什么是思维科学。现在我想所谓感觉

---

① 辑录自钱学森给戴汝为的信件、讲话。

和知觉都是人体科学中神经心理学要研究的领域;而更上一层的所谓感受则是精神学的研究领域。我们讲的社会思维学实是研究人在集体讨论所触发的大脑激化状态下的思维,所以它主要是神经心理学和精神学的事;只处理所获得的信息,那才是思维学的研究课题。

(2) 这就提出思维学是研究加工信息,而不是研究如何获得信息,那是人体学的事。人体学要研究人在集体讨论中大脑的激化状态;人体学也要研究特异功能人是怎样接收与处理信息的。

(3) 这样,思维学的任务就是怎样处理从客观世界获得的信息,包括 Popper 的“第三世界”这个非常重要的信息源、信息库,以获得改造客观世界的知识。处理可以只是人干,也可人-机结合(机器干一部分)。

1995 年 3 月 16 日

1.2　思维科学内容和科学技术体系

我讲过有三种形式的思维,这就是形象思维、抽象思维、灵感思维。具体人的思维,不可能限于哪一种。解决一个问题,做一项工作或某个思维过程,至少是两种思维并用。两种,就是抽象思维和形象思维。所谓三种,就加上灵感。有一点请文艺界同志理解,科学技术不都是抽象思维。都是推理吗? 都是所谓“科学的根”的推理吗? 不是那么一回事。要那么样,科学根本没有办法发展。这个爱因斯坦讲得很清楚,他说,科学发展不能尽靠推理,还有直感。那直感就是形象思维。科学艺术界从前认为搞科研就是抽象思维。这事实上不可能。举一个很简单的例子。譬如人的手艺就不能只靠抽象思维。一个有经验的钳工老师傅,拿起一块不平的铜片,当当几下,就敲平了。如让我去敲,越敲越不平。什么道理,那就很难用抽象的道理把它说清。他可以给你讲,注意这,注意那,但总是形象的。我看这就是形象思维。娃娃先有形象思维,而不是抽象思维。人从小就会形象思维,说话、识字,就是形象思维。如果要推理,高小学生都不大行,到初中才能搞复杂一点的推理。对小孩子没法讲道理,他就会模仿。模仿就是形象,不是推理。从这个意义上来说,形象思维是普遍的。思维科学作为基础科学就要研究抽象思维、形象思维、灵感思维这三种思维的形式及其规律。关于抽象思维,现在形式逻辑搞清楚了,至于说辩证逻辑还是不清楚。有许多辩证逻辑的书,它总是经典著作中辩证法的那几条,而具体怎么用,就没有了。

看来,现在突破口是形象思维。形象思维搞清楚了,灵感思维的内涵、规律,也就差不多了。因为灵感实际上是潜思维。它无非是潜在意识的表现。人的大脑复杂极了,我在这里与同志们交谈,用的那一部分叫显思维,或叫显意识,这我可以直接控制,有意识地控制。那个潜意识,控制不了,没有办法控制。但是它同时在工作,就是不知道它怎样工作,它工作的状态怎样。我想大家在工作中也会有体会,苦

思冥索不得其门，找不到道路，然而不知怎么回事，它突然来了，这就叫灵感。我们在科学工作中也有这样的情况，常常一个问题，醒着的时候总是想不起来，不想时，或夜里做梦，却忽然来了。这说明潜意识在工作。你自己不知道，可是它在试验。试验行了，它就通知显意识，这就成了你的灵感。

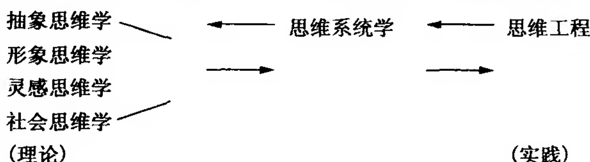
潜意识是怎么工作的？采取什么方式？原则上讲恐怕也不外是抽象思维和形象思维。可是无法反省，反省不了。心理学研究表明，人所谓的自我不是一个，而是多个自我，这多个自我协调工作，就是正常的人，如果不协调工作，就变成精神病者，叫精神分裂症。一个人的思维也就是这样，潜意识、显意识，相互协调进行工作。对于潜意识的思维方式，现在只能讲到这样的程度。如果再要追下去，就要涉及到大脑的功能机理，大脑神经元的功能。那样，彻底是彻底了，但是目前只有等着，现在什么事都不要做了。因为人的大脑神经元的作用太复杂了。最近 20 年，脑科学有很大发展，但是直到现在光是视觉还不知道是怎么回事。如果要从神经元追索，大脑皮层是什么东西等等，要那样彻底，只有等待。可是不必等待，人总有实践，实践是可以总结的。不要一次就追到根子下边去，而且现在也做不到。如果你一定要追，那么我就不要搞思维科学了，我去搞脑科学去了，脑科学搞清楚了，再搞思维科学。而事实上没有这个必要。所以，我觉得还是从总结经验入手。什么是显意识、潜意识？什么是多个自我？人有那么多实践，那么多事实，总可以解决些问题嘛！

至于说抽象思维、形象思维哪一种是更基本的？这恐怕不能绝对化。就我自己搞科学技术的经验来看，两种都有。在文艺创作中，很强调灵感，还有只能意会、不可言传的这种情景，其实在科学工作中，许多时候也是这样。但科学不同于文艺之处，就是最后还要推理、证明。

1984 年 11 月 1 日

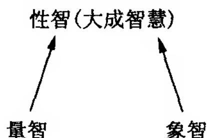
我近来看到一些文艺人讲文艺理论及审美问题的文章，又勾起我从前说过的老话：任何人们对具体问题的思维都是综合抽象思维和形象思维（有时还有灵感思维）以及社会思维的思维过程。但是人在思维，人的其他素质如生理因素及心理因素也一定会起作用。所以我现在想：作为思维科学的应用的具体思维应该是综合性的，是一项系统工程，叫“思维工程”吧。一般讲的科学思维、艺术思维、领导思维、创造思维、审美思维等等，都是思维工程。

指导思维工程的技术科学是思维科学中间层次的思维系统学。



1988 年 1 月 1 日

至于人的思维，我们一直说有抽象（逻辑）思维、形象（直感）思维、灵感（顿悟）思维和社会思维。又说有量智及性智。近日我想：性智又分两层，低一层次是以形象为基本的，可以称“象智”，高层的才是性智。所以



1993年1月25日

这样看思维学就只有三个部分：逻辑思维，微观法；形象思维，宏观法；创造思维；微观与宏观结合。创造思维才是智慧的泉源，逻辑思维和形象思维都是手段。

到今天，我们对逻辑思维研究得最深；对形象思维只是搞了个开端；对创造思维则尚未起步。对思维学我删去灵感（顿悟）思维、社会思维和特异思维，加一个创造思维。也把以前的抽象（逻辑）思维简称为逻辑思维，形象（直感）思维简称为形象思维。

有吴文俊的工作，所以逻辑思维的任务看来可以交给机器去干。而对形象思维的计算机化才开始，现在主要靠人。至于创造思维，现在只能靠人了。当然，人在思维过程中离不开信息网络。

1995年3月16日

我认为人的思维从根本上来说是人脑在接受了实践感受后的结果，是人脑的产物。分三类：① 逻辑思维，这是总结了大量思维之后，得出的体系化思维；② 形象思维（包括灵感思维）则是从实践中体会出的，但还未形成体系的思维；③ 创造思维，即前两种思维的有机结合。H. A. Simon 的工作是有意义的，在于他努力从无规章的思维中找出规章，即符号体系，从而纳入逻辑思维，能进入电子计算机。但这一工作永无止境，困难不少；不能因而就排除形象思维，那会使人变傻。您和您的学生做的手写数码机器识别工作就是一例；不是最后还得用人-机结合吗？

W. Clancey 的观点强调了“智能体（实即人脑. 实践）”的作用是对的，但他似又堕入经验主义哲学，而不是辩证唯物主义的“实践论”。

1996年1月4日

1.3 思维科学研究的途径

（1）我想文中所论问题“都是探索性很强的工作，人的主观能动性非常重要，‘死心眼儿’不行，机械唯物论也会误事；我们有辩证唯物主义这个锐利的思想武器，

这是我们之所长(《求是》杂志 1989 年 5 期 8 页)”。请注意运用马克思主义哲学。

(2) 所以要实事求是。我在 1983 年(见《关于思维科学》,上海人民出版社,1986 年,18 页)和 1984 年(同上书 150 页)都一再强调,脑科学还没有达到 psychological mentalics 和 mentalics,所以这些属人体科学的学问尚不能作为研究思维和思维科学的基础。目前,我们搞思维科学(及技术)只能靠我们从宏观上猜思维现象;当然不放弃从脑科学吸取点滴启发。近见 H. K. Kimelberg,M. D. Norenberg 文(附复制件)更加深了这个认识:过去脑科学家们把占大脑体积一半以上的神经胶质细胞忽视不考虑,只注意神经元,现在才认识到原来胶质细胞也有重要作用! 可见我们对大脑,连其基本结构和其组成部件之间的相互作用都还不清楚,侈谈模拟神经网络,可谓痴人说梦!

(3) 我反对在我们工作中随便用“神经元网络”这个词,那是不科学的。外国人用(见附 E. Domany 文)是他们的无知!

(4) 不是模拟神经网络,但就仅有的一点脑科学知识也会给我们一点启发,这就是网络。我前几年也提示过,我说形象(直感)思维不是(逻辑)思维那种线型的,一维的,是面形的、二维的(见《关于思维科学》上海人民出版社,1986 年,135 页)。现在的名字叫 connectionism。这一启发与大脑的关系,就如人们要发明代替人走、人跑的机器,而从一个桶子滚动想到车轮一样。

(5) 大概一年前吧,我提出过“思维系统”,讲了思维体系的层次结构。这与您的文章不谋而合了。所以您们这一思想我很赞成。

(6) 文稿最后一节讲到哲学,怎么不提马克思主义哲学? 第三种观点应该是辩证唯物主义的观点,那就不会陷入不可知论了。

(7) 文题中“人类”二字似可略去,有思维的还不是人吗?

(8) 我猜想:我们在考虑的层次,已比大脑细胞层次高得多。

总之,长文很有分量,我希望您二位再推敲一番,使之更上几级。

原稿附还。

1989 年 5 月 14 日

我强调人脑是一个开放的复杂巨系统,我们现在只能从高层次、即宏观层次上考虑思维活动。因此,要借助心理学和哲学。

1989 年 5 月 19 日

(1) 作为一个物质系统,如何去形容人脑? 我认为应该用系统学的概念:人脑是由几万亿脑细胞组成的开放的复杂巨系统。对待复杂巨系统,现在和今后相当长一段时间里,只能用高层次的即宏观方法,用理论与实践相结合的方法去探讨。那种从微观做起,所谓神经网络模拟,是不切实际的;因此也是自欺欺人的。

(2) 思维科学和模拟智能的基本观点就建立在上述概念上。

（3）由思维科学的基础科学思维学产生描述思维规律的逻辑学。近年来，由于K. Godel，A. Turing等人的启发，逻辑学由经典的一阶逻辑开拓为现代的各种高阶的模态逻辑（见J. Barwise，S. Feferman主编《Model-Theoretic Logic》，Springer 1985。由逻辑学才产生数学科学的方法论，元数学（metamathmatics）；数学是以元数学为依据的。元数学不是数学哲学——数学科学的哲学概括，因为数学哲学的任务是说明数学在人认识客观世界中的作用，见图1-1。

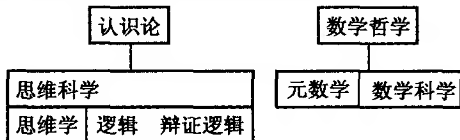


图1-1

我在8月18日的会上强调：数学家要注意现代逻辑的发展，以开拓数学方法论的元数学。

（4）反过来，搞思维科学、思维学和模拟智能的人不就更应该重视现代逻辑的新发展、模态逻辑吗？模态逻辑离得更近嘛。这我在1988年初写的《思维的系统观——思维系统》中是说过的。

（5）您们文稿中对搞模拟智能的起步该在什么地方，如何从人-机结合一步一步提高？讲得少了些。我认为这个工作设想是重要的，应当写清楚。

1989年8月24日

我现在想：我们原来称为“定性与定量相结合综合集成法”，似可改称“从定性到定量的综合集成法”。它实际是：

（1）综合集成定性认识达到对整体的定量认识；

（2）“法”即技术工程，是综合集成工程，英文为metasynthetic engineering；

（3）综合集成工程居思维科学的工程技术层次，创立并发展它将为思维科学的技术科学层次及基础科学层次（思维学）提供营养；

（4）再上面的哲学概括——认识论……

1990年5月19日

这几天翻看了您9月送来的文章《综合各种模型的知识系统（英文名似应是Knowledge Systems by Synthesizing Various Models）》，同时也看了其他几本“知识工程”、“知识表达”的书。我以为：我们的目的是设计制造能代替一部分人的脑力劳动的智能机，而这项工程技术就是人工智能，或称“人工智能学”。您提出并使用了“知识系统”这个词很好，因为的确是个“系统”。以前大家探索，提出各种模型，那都是“一得之见”，有其模糊之处。只有把各种模型综合起来，才能互补，才能从模糊到

清晰。这是不是也可以说是一种“从定性到定量”、“从感性认识到理性认识”？这里系统的概念是很有用的。

我以前说过：智能机是现在及今后50年我国的尖端技术。现在我想，智能机和人工智能是工程技术，属思维科学的实用层次；而上面提到的知识系统或知识系统学则属应用科学，是思维科学的中间层次；所以智能机的工作最终也将有助于思维学的研究，思维学属思维科学的基础学科层次。这一点我以前也说过，现在更清楚了。

我很希望你们的工作能应用到国家的大工程：综合集成工程，即从定性到定量综合集成总体设计部。而这里面也有许多子项目，如情报信息的提取与提炼，也就是国外叫 data fusion，我称“情报信息的激活（information inspiritment）”的工作，这也要用你们的工作，以自动化。

1990年10月4日

看来恩格斯早就提出“辩证思维”的概念，而且明确了这是人所特有的，其中“悟性”十分重要。我们只是更加提得尖锐些，把“悟性”归结为“直觉”、“灵感”这种非理性思维活动；所在是在做一点发展深化工作。

至于“辩证逻辑”，按恩格斯的话，实是现代逻辑学中的多阶逻辑，即模态逻辑，也可以说是逻辑系统。所以辩证逻辑仍属抽象（逻辑）思维。

辩证思维是三种思维的综合，才是思维系统。这样比1988年提出的“思维的系统观”又进一步了，更明确些。

1991年10月25日

收到您7月11日信后，读了好几遍，对我启发至深！您从中国传统文化中的“意”与“象”的关系，把它们都作为整体宏观的思维来考察，把“意”作为最高的理性认识，“象”则为感性认识。这是注入了从定性到定量综合集成的思想，好极了！

Arnheim 的《视觉思维》只说到“象”。中医的“望闻问切”是经过医生用学问和经验综合判别为医“象”，但怎样治病，还要进一步用中医的人体宏观理论，阴阳和金木水火土相生相克的理论，加临床经验，再上升为治病的“意”。您最后的 $P^i(I^i, S^i)$ 是思维认识的简洁表达。我们的大成智慧工程与大成智慧学就是这个思想。您把形象思维和抽象思维融为一体了。用此理论培养学生，就可以适应我前次给您去信提出的问题：如何迎接即将到来的多媒体技术和灵境技术世界。当然讲辩证统一，还靠马克思主义哲学。

1993年7月16日

我近日在想：既然文学创作中要运用抽象（逻辑）思维、形象（直感）思维和灵感

(顿悟)思维,那我国几千年古老的文学作品不就是三种思维的结晶吗?那我们为什么不从中国的赋、诗、词、曲及杂文小品中学习探讨思维学呢?它们是最丰富的泉源呀。

最容易的是对联。这在旧中国是文人思维的基本功。它也最容易分析入手。例如:最熟知的有:

五月黄梅天

三星白兰地

这最简单,只是字与字对。复杂一点是毛泽东与周恩来的对联:

橘子洲,洲旁舟,舟行洲不行(毛泽东)

天心阁,阁中鸽,鸽飞阁不飞(周恩来)

这就不只是字与字对,而且有巧妙的涵义。

更深一点是清代名儒纪晓岚被一江船上武夫难倒的故事。这武夫乘的船有帆,纪晓岚的船无帆用橹。武夫出联为:“两舟并行,橹速不如帆快”。这里利用“橹速”与“鲁肃”谐音,“帆快”与“樊哙”谐音,说文不如武。纪晓岚一时无对,被困数日,闷闷不乐。直到数日后抵福州主持院试大典,听到乐声,才顿悟到,下联应是:

八音齐奏,笛清怎比箫和

这里“笛清”与“狄青”谐音,“箫和”与“萧何”谐音,说武不如文。这对联就不止于形式,字与字对,而且通过谐音运用,达到对仗。

这种文例极为丰富,长联发展到昆明大观楼长联,每联九十字。更有邓小平旧居长联,每联二百五十字!真洋洋大观,是一宝库,也是我国文人的心血。

从思维学角度看,对联的过程是:出联的上联是给出一个结构,请应联的下联人按此给定结构去找零件,字、词填入这个结构,思维就在于搜索思想库找材料。这就是对联答对联的思维学——搜索入结构。

我自己体会,所谓形象(直感)思维则是与上述答对联相反的;有材料,但无结构。思维的任务是找形象,即结构。相反,不也相成吗?我们总结中国极为丰富的对联文学,不能为研究形象(直感)思维作贡献吗?知道形象(直感)思维是从零碎材料找结构不就是一个开端吗?从思维学的角度研究中国古代文学是值得的。

1994年9月18日

1.4 思维能力的提高

我想到一个问题:人脑的思维能力是不断发展的:

(1)人类的历史含有此意;

(2)一个人的思维能力也如此。

那么,它又是怎样发展的呢?第一是人脑这个开放的复杂巨系统有很强的可塑

性，是活的，不是死的、不变的；第二加实践的作用。K. Popper 有三个世界说：第一世界是我们说的不以人的意志为转移的客观世界；第二世界是主观世界，即脑；第三世界是人类实践累积的知识信息世界，这当然是当前人和他人实践的创造物。因此，我想人的思维能力是第一世界与第二世界和第三世界相互作用的成果。

这样，研究脑科学的任务就是搞清这种思维能力发展的机理、机制，是精神学 mentalias 的核心。而思维科学的任务就是从思维的角度找出思维能力的途径并付诸实施。当然这里首先要解决：什么叫思维能力？也就是什么叫聪明、智慧？

我们要研制的从定性到定量综合集成研讨厅体系就是完成思维科学这一任务的一个建议。这能不能说是开拓性的想法？

思维科学也是动态的科学，不是静态的科学：我们要创立思维动力学，而以前我们说的只是思维静力学。

1992 年 3 月 23 日

2 模式识别与形象思维学[①]

2.1 引言

从信息处理的角度来看，计算机是一个信息处理器。人脑也是信息处理与加工的器官，这种加工是以符号信息加工为核心；语言就是一些符号串，信息的存储是记忆；记忆、思维与语言有着密切不可分的关系。人通过大脑这个信息处理器官，可以从一大堆不准确的材料中抽取特征，抓住主要的因素，进行模式识别。一个人到一大群人中间去寻找他的朋友，即使他们多年未见，朋友的面容、体态和装束打扮也有很大改变，他仍能准确无误地认出自己的朋友。人所以具有目前程度的识别能力，是人类经过千百万年的实践逐渐形成的。根据脑结构专家们的研究，在人类的进化中，人的认识功能是有阶段性的。在进化中脑会发生结构重组，包括第一视觉槽皮质区的缩小和跟认识功能有关部分脑的增大。有一种观点认为，中枢神经结构重组有可能增强在复杂环境提示下的辨别力和扩大预见力及记忆力。人类进化到现在，其识别功能达到了非常高的程度。人脑这个器官还能够从以往的经验积累中获得知识并加以利用，从而具有智能行为。

人工智能的研究已经有了近 30 年的历史。近些年来，对专家系统的研究使人看到了人工智能付诸实用的前景，从而大大鼓舞了人心。日本在 20 世纪 70 年代完成了一个围绕着模式识别研究的模式信息处理计划(PIPS 计划)后，在 80 年代又提出了一个知识信息处理计划(KIPS 计划)，也就是第五代计算机计划。所谓第五代计算机可以认为是第一代智能机，智能机的出现将是一次技术革命。这种新型机器能直接感知文字、图像、声音、物体等模式信息并为人机通讯提供方便。研制智能机，如果从更高的角度来看，人脑与机器两者均能对信息进行加工处理，但是人脑能进行直感思维，这是目前的机器所无能为力的。在费根鲍姆与女作家麦科达克合写的书中，有下面的一段话："我们认为最能显示人的特点的一切结构精密的符号制造物，如数学和逻辑、拼接基因或在根据仪器推断下的地质实况的能力，计数机处理得最高明，因为知识结构最严密，我们越容易把它编纂起来供计算机使用。另一方面，在现实世界中生活并不是一项结构严密的任务——一般家畜都能轻而易举地对付，

---

① 钱学森主编. 关于思维科学·模式识别与形象思维学(戴汝为). 上海人民出版社，1986

但是机器不会。这并不是说它们永远不会、而是说目前不会”。的确，关于人的智能活动，人如何根据自己的经验来进行思维的？其机制如何？这些问题的研究对发展智能机有深远的影响。近几年来，钱学森以开发智能机为目标，明确提出了当前思维科学的突破口——形象（直感）思维的研究。从基础理论到应用技术的关系来讲，形象思维学属于思维科学中的基础科学层次，而科学的语言学和模式识别则属于技术科学层次。在建立基础科学的过程中，往往需要向技术科学求援，即先研究具体的，再抽象出一般的。

科学的语言学（数理语言学、计算语言学）与模式识别这两门技术科学从表面上看似乎没有什么共同之处，其实两者之间有一致的地方。近 15 年来形成了句法模式识别。近几年来考虑利用语义信息，发展为语义句法模式识别，开始把模式识别与科学的语言学两者沟通起来。语义句法模式识别方法与以前的方法相比较，更接近于人脑识别模式的方法。新近发展起来的计算语言学，把语言看作是以知识为基础的通讯过程，这是人工智能专家们的观点。在这一领域内新形成的词汇功能学派所致力于建立的语言模型，是既包括句法结构又包括语义的。在将来，肯定会出现比较接近于人的思维的模型。

近来，国内外一些模式识别的专家们主张，解决模式识别的问题应以知识为基础，其代表为联邦德国爱尔朗根大学的涅曼，他在 1982 年出版的英文版《模式分析》一书中表达了这种观点。涅曼本人主要从事语音理解和图像理解的研究工作。像语音理解这样的复杂问题，不利用各种知识是无法解决的。谈到以知识为基础，这就必然要考虑到人的经验这个重要因素，其结果必然与思维科学结下难解之缘。看来今后将通过专家系统的途径来解决机器识别模式的问题，研究模式识别的专家系统。这也可以认为是第一代智能机的任务之一。根据此种观点，模式识别的研究与形象思维的研究相结合，也就是自然而然的事情了。

2.2　短语结构文法与自动机

近代语言学的特点是利用数学作为工具来研究语言，以计算机为工具来研究语言。语言学和数学相结合形成了数理语言学。最初关于语言的数学结构的探讨，其目的在于了解自然语言的性质，通过研究发现具有一组产生式规则的短语结构文法来描述语言。20 世纪 50 年代，这一概念由心理语言学家乔姆斯基和巴希勒尔以及他们的合作者加以发展与形式化。1960 年以后，发现由巴库士范式定义的程序语言 ALGOL60，是短语结构文法产生的短语结构语言中的一类语言——上下文无关语言。这一发现打开了从理论上取代仅用启发式的办法来研究程序语言的可能性。

另外，把语言看作是以知识为基础的通讯过程（包括人与人的通讯、人与机器的通讯），是计算语言学的观点。

这里着重谈谈乔姆斯基的语言生成转换理论的一个部分,即由短语结构文法产生的语言的一些基本思想及其与自动机的关系。乔姆斯基针对过去语言研究中的归纳方法,建立起一个演绎性的形式语言系统。某种语言 L 有一个字母表 V,V 是构成语言 L 的有限个符号的集合。如英语的字母表 V={a,b,…z)。字母表中的符号从左往右排起来构成长度有限的符号链。符号链 X 的长度表示链中所包含的符号的数目。一个语言中所包含的句子总是无限多。文法就是产生无穷多句子的一种有限的表示法。为了方便起见,我们用一个中文句子“优秀的学生学习努力”来说明什么是一个文法。在这个句子里,“优秀的学生”是一个名词短语作为主语,它由形容词“优秀的”和名词“学生”组成。“学习努力”是一个动词短语,由动词“学习”和副词“努力”组成。这样一个句子的产生可以用如图 2-1 所示的树状结构表示。

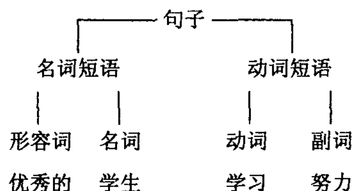


图 2-1 树状结构

在这里有些符号是可以加以代换的,例如〈名词短语〉可以用〈形容词〉、〈名词〉来加以代换,这样的符号叫做非终止符。有些符号如学生就不能再用其他的符号来代换称为终止符。对于非终止符的代换当然应该有一定的规则可循。所谓的一个短语结构文法是一个形如 G=(V_N,V_T,P,S)的四元式,其中 V_N 和 V_T,是非终止符和终止符的字母表,P 是对非终止符进行代换的规则的集合,称为产生式集合,S 是 V_N 中的一个符号,称为起始符。在上面例子中:

V_N={〈句子〉,〈名词短语〉,〈动词短语〉,〈形容词〉,〈名词〉,〈动词〉,〈副词〉}

V_T={优秀的,学生,学习,努力}

S=〈句子〉

产生式集合 P 包括如下产生式:

〈句子〉→〈名词短语〉〈动词短语〉

〈名词短语〉→〈形容词〉〈名词〉

〈动词短语〉→〈动词〉〈副词〉

〈形容词〉→优秀的

〈名词〉→学生

〈动词〉→学习

〈副词〉→努力

用上述例子说明什么是一个文法,上述文法仅产生一个句子。而描述一个语言

的文法，一般说来是能够产生无穷多个句子的。把句子的生成与图像的构成加以比较，也可以用短语结构文法来产生或描述图像。

乔姆斯基根据产生式 $\alpha \rightarrow \beta$ 的不同形式，把短语结构文法分成四种类型。第一种称为 0 型（没有限制）的文法，即产生式箭头两端的符号链 α、β 可以是任意的。第二种称为 1 型文法，产生式的形式为 $\alpha_1 A \alpha_2 \rightarrow \alpha_1 \beta \alpha_2$；这意味着只有在上下文分别为 α_1、α_2 的情况下，非终止符 A 才可以由符号链 β 来加以代换。所以 1 型文法又叫做上下文敏感文法，所产生的语言称为上下文敏感语言。第三种称为 2 型文法或上下文无关文法。产生式的形式为 $A \rightarrow \beta$，没有上下文的限制。第四种类型称为 3 型文法或有限状态文法，产生式形式为 $A \rightarrow \alpha B$，或 $A \rightarrow b$，其中 A，B 是非终止符，α，b 是终止符。从 0 型文法到 3 型文法，对于产生式的限制是逐步增加的。因此它们之间有这样的关系

$$0\text{ 型} \supseteq 1\text{ 型} \supseteq 2\text{ 型} \supseteq 3\text{ 型}$$

它们所产生的语言之间也有这样的关系。

我们可以用不同的观点来看待语言。一种是生成的观点，即一个语言中的句子是由什么样的文法生成的；另一种是接受的观点，也就是一个语言能用什么样的自动机来加以识别。文法与自动机之间有着密切的联系，每一种类型的短语结构文法均可与一种类型的自动机相对应：有限状态文法与有限状态自动机（finitestate automaton），上下文无关文法与非确定下推自动机（nondeterministic Pushdown automaton），上下文敏感文法与线性有界自动机（1inear bounded automaton），0 型文法与图灵机（Turing machine）相对应。

2.3　语言的通讯模型

随着数字计算机的广泛应用，计算机渗透到社会经济以至文科等各个领域。一些有识之士提出把普及计算机程序作为第二次“信息扫盲”的主要内容。计算机对于语言学的研究也产生了深刻影响，计算语言学就是这种影响的产物。计算是一种比喻说法，是作为人们编制程序运用计算机的经验的一种了解。计算机的工作是完全开放的，容易检验。人们可以编制程序，利用数据库和知识库来说明和论证人们的想法。

按照计算语言学的观点，把语言看作是以知识为基础的通讯过程，以知识为基础就离不开人的经验。在这个过程中有主方和客方，即语言的产生者与理解者，双方都在进行信息处理，运用他们关于语言及通讯主题的知识。实际上，这牵涉到高度复杂的模式识别问题。语言学家们的任务是研究与了解这种过程的组织及知识结构。

为了说明上述看法，我们用一个方框图来给出一个协作通讯的模型（图 2-2）。

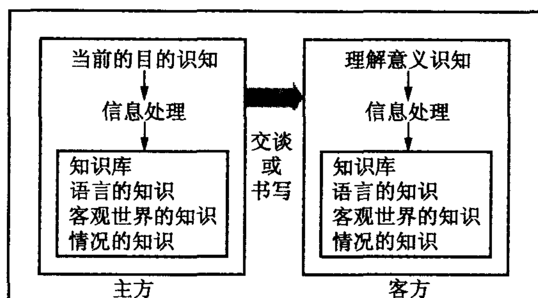


图 2-2　一个协作通讯的模型

在这个模型中，语言体现为人或具有智能作用的机器之间的一种通讯过程。主方有目的地开始通讯包括预期达到什么效果，信息的有效传送，作什么姿态；以口头的或非口头的方式对客方（或客方中的一部分）产生作用，使得客方在通讯的主题方面，或者在主客双方之间互相作用方面作出推断，或者作出相应的反应。如果主客方都是人的话，那么在这一过程中双方都在进行复杂的思维活动，而根据经验积累所形成的直感思维起着主导作用。

一种语言提供了各式各样可以由使用语言者掌握的信息源，如字的选择，构成什么样的句子；着重点与音调的高低起到提供必要的线索的作用，使客方能判断了解主方进行通讯的目的所在。为了从这些信息源中进行适当选择，主方必须把预期的谈话目的与正在谈论的内容以及客方已经掌握的知识结合起来；关于言词的选择与主方的期望有紧密关系，希望客方利用他们的知识和聪明才智加以推断作出解释，对方的答复则是一种反馈作用，对不清楚的地方再补充一些信息。

方框图 2-2 表明了模型的结构，并指出有关的知识包括语言的一般知识，客观世界的知识以及有关情况的知识等。

2.4　模式识别

用计算机进行模式信息处理，对文字、图像、声音、物体等进行分类、描述与分析、理解是模式识别这门新兴技术科学的主要内容。模式识别的研究对于研制第一代智能机有非常密切的关系。目前模式识别已在一定程度上直接或间接地得到应用。已经设计出各种模式信息系统，光学文字识别机，细胞或血球识别机，声音识别装置等，这些在国外已成为商品。模式识别技术也开始用于设计，以利用图像信息为基础的自动检验系统。序列图像分析、计算机视觉、语音理解和图像理解系统的研究与实现已成为普遍感兴趣的问题。

我们先扼要地谈谈统计模式识别与句法模式识别，然后在以下两节介绍一点语义句法模式识别，以及以知识为基础的模式识别的观点，通过后者可以看出思维科

学中形象思维的问题非常突出，有待于作进一步研究。

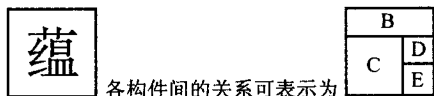
以往根据用于解决模式识别的两种一般性方法，把模式识别分为统计(决策理论)模式识别与句法(结构)模式识别两大类。统计模式识别着眼于找出一组能反映模式特点的特征，首先把模式进行数据压缩以抽取特征，并考虑到对于通常遇到的干扰和畸变来说，所选的特征具有不变性或者至少是很不敏感。如果抽取 N 个特征能够基本描述原来的模式，那么就用 N 个特征构成的一个向量来代表原来的模式。于是模式识别的统计法就以高维随机向量分析为基础。模式分类就相当于把特征空间划分成若干部分，每一部分与一个模式类相对应。当出现一个新的模式时，就根据描述这个模式的向量位于特征空间的那一部分而判定属于哪一类。句法模式识别方法，则完全从不同的途径来解决模式识别问题，它着眼于把模式的构成与语言的生成加以类比，借鉴数理语言学的方法与结果。这样，就把识别方法建立在数理语言的基础上。前面介绍过的短语结构文法，稍加修改就可以用来描述和识别图像模式。只要着眼于一幅图像如何由比较简单的子图像构成，子图像又如何由更简单的子图像构成，等等。就如同英文句子由分句构成，分句又由短语构成，等等。一幅图像就相当于由某种文法规则产生的句子。模式的表达形式可以像语言由符号构成的链那样，是一条由某些特征或基本单元组成的链，也可以是一种树状结构或者是图(graph)的形式。识别模式可以体现为描述模式的特征链为某种类型的自动机所接受，或者是对描述模式的特征链(句子)进行句法分析，分析一个句子对于某个文法来说，在句法上是否正确，从而决定这个句子所描述的模式属于哪一类，不仅决定了模式的类别，也给出了一种描述。句法模式识别的研究不像统计模式识别那样透彻，它是最近 15 年才逐渐发展起来的。1974 年美国普渡大学傅京孙发表了第一本专著《模式识别中的句法方法》，奠定了句法模式识别的基础。句法方法抓住了图像模式与语言两者之间在结构方面的共性，加以沟通，给模式识别打开了一个新局面。

如果构造一个文法来产生一种语言，而这种语言中所包括的句子恰好能描述我们感兴趣的模式，那么识别模式就变成识别语言了，下一步就是设计一个识别程序来识别由文法所产生的语言。至于有了一类模式，怎样才能设计出一个文法来描述这类模式？从理论上讲，这可以根据一系列所获得的模式样本，利用文法推断的方法推断出文法规则，这样问题就解决了。近年来，虽然有人致力于文法推断的研究，但是要想得到实用性的文法推断的算法是件相当困难的事，所以进展不大。

2.5　语义句法模式识别

在模式识别发展的早期阶段，研究得较多的是模式分类或自动求聚合类，所用的方法就是前面谈到的统计法。这种方法与人脑的模式分类看来没有什么共同之

处。至于后来为了进行模式描述与分析所用的句法方法，有点类似于用语言。人们说话与理解别人讲话，都需要利用知识，所以不能离开记忆。一些实验表明，人们的记忆中起主要作用的是概念，是语义，而不是句法。人的视觉信息如何存储到长时记忆中去，是心理学上比较困难而又迷惑不解的问题。例如，一个"长方形"，存在人们的记忆中，也许人脑中实际存在的不是那个"长方形"的形状，而是一些结点和链（实际上也可能不是这样，只是想象而已）。同样，如果一个东西的意义存储在脑中，肯定不是把几个字或一句话存进去，可能是一句话的意义彼此之间的关系[8]。总之，除了构成句子的句法这个因素外，对于记忆与认识说来，语义起着十分重要的作用。在上述思想的启发与影响下产生了模式识别的语义句法方法。即在原来句法方法的基础上，引入基元的属性，子模式之间的关系属性及语义规则，用带有属性的文法来对模式进行描述与分析。我们通过对合体汉字的描述加以说明。合体字是由两个以上的构件组成的字，如果把笔画作为基元，那么基元的属性就是笔画的长度。关系属性表示出两个构件之间的相对位置，例如两个构件"九"和"日"可以因为相对位置不同、大小不同而形成两个不同的汉字"旭"和"旯"。下面的例子可以作进一步的说明。我们可以认为一个合体汉字位于一个方框内，如



也就是说，四个构件间的关系可以通过构件所在的矩形框 B、C、D、E 的相对位置来决定。每个矩形框的属性是框的面积，而前面提到的语义规则是描述如何由 B、C、D、E 这些矩形框构成原来的方框的规则。可以用一种树状结构（图 2-3），也就是由一个文法所给出的导出树来表示这些框之间关系。

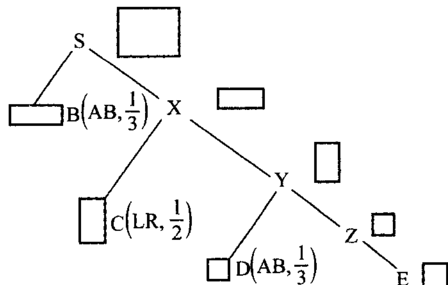


图 2-3 树状结构

符号 AB、LR 分别表示"上下"、"左右"等相对关系；1/2、1/3 表示该矩形框所占的比例

研究合体字之间的相互关系是有积极意义的。一些心理学的试验表明：人们的记忆中是概念，是概念和概念之间的关系。另外，人的记忆并不像机器那样以二进制的位（bit）为单位，而是以模块（chunk）为单位。把合体字的每个构件当成一个模

块是非常自然的事。

一个带属性的文法包括句法部分和语义部分，而这两者之间存在一种折衷的关系，即如果使语义部分复杂一点，那么就可以简化句法部分；反之亦然。实际上句法模式识别和统计模式识别可以看成是带属性的文法的两种极端情况。统计模式识别只考虑语义部分，把整个模式当成一个单元，而不考虑结构，而这个单元的属性就是它的特征向量；而句法方法就是只考虑模式如何构成，而忽略了语义。实际上，语义句法方法是在一般短语结构文法的基础上加入语义信息，把以往的统计模式识别和句法模式识别有机地结合起来。在某种意义上讲，这一方法更接近于人脑识别模式的方法。

2.6　以知识为基础的模式识别

前面谈到利用语义信息所建立的语义句法模式识别方法，对于描述与识别由线条（曲线及直线）构成的图像是非常有效的。这里所说的语义并不是语言中一个句子所表示的意义，而是一种属性；或者说是一种简单的知识。而有些更复杂的问题，例如语音理解和图像理解就需要各种知识，需要更高层次的知识。知识有两类：一类是某一范畴内的事实，比如写在教科书或者专业刊物上的事实；另一类知识目前称之为启发式(heuristic)知识，是凭经验得到的知识。经验必须与推理结合起来才能起作用。什么是形象思维呢，就是突破了单纯的逻辑，把经验和推理结合起来了，这是有重要意义的研究课题。

语音理解(speech understanding)和图像理解(image understanding)是比模式的描述与分析更为复杂的模式理解问题。研究语音识别和理解的动机有两个方面：一是促进人与机器之间的通讯，使得人机交互简单方便，不必采用手写或按键这种中间手续，使人机通讯技术跨进一大步，这对发展智能机有着影响，在近期可应用到工业和行政管理方面；二是在于深入地了解复杂的人脑机制，在这种机制下用一些可检测的物理特征来感知口语和说话声音的特点。

有两种不同的语音译码，一种是被动模型，另一种是主动模型。在被动模型中，人接受语言的过程可看作是三个连续的步骤：感觉、了解、认知。“感觉”涉及的是处理未知的信号；“了解”是把感觉到的信息分为字或对象；“认知”则是建立字或对象之间的关系。这种被动模型曾经用来设计识别孤立语音的系统，并由声音的预处理、特征抽取以及模式匹配三个环节构成系统。

然而，听话者所具有的各方面知识，如句法、语义、符号学方面知识以及音韵和韵律等，都可以用来帮助译码。有人建议，应该用知识来制导整个识别过程。以主动模型为基础接受语音的系统，就称为语音理解系统。

另一个目前在模式识别领域中受到重视和引起兴趣的问题是图像的理解。例

如在一幅图像中或者一系列图像中，是否有所要寻找的目标。图像理解也是一个主动的过程，需要利用知识。最终的要求是对图像作出分析与解释。可以用下面的方框图给出图像理解系统的一般概念。

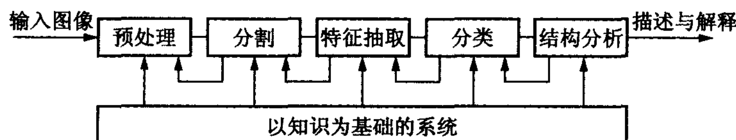


图 2-4　图像理解系统

图 2-4 系统中的预处理，包括图像的增强、复原和编码等。分割是把图像中灰度级不同的部分分开，然后在分开了的各个部分找出能描绘该部分性质的特征。特征抽取的目的是为了进行分类；分类的目的是希望对整个图像作结构上的分析；进行结构分析在于给出图像的一种描述，并对图像中的重要信息给予解释。系统中每个环节都对前面的环节有一种反馈作用。在进行图像信息处理与识别的过程中，还需要来自外界的信息。例如来自一个知识库、或者以知识为基础的系统，以知识为基础指的就是人的经验。

从较简单的模式分类到模式分析以至到模式理解，问题越来越复杂。今后所研究的模式识别，其主要内容很可能就是实现某种识别要求的专家系统，即模式识别的专家系统。虽然专家系统已经大有可以付诸实用的前景，研究人员也为此备受鼓舞，然而问题并没根本解决。1983 年人工智能专家香克对一批学者说，专家系统有缺陷，因为它们不能起到人脑所起的一个关键性作用，即从过去的经验中学到东西。这位专家还说，这个系统中的所有信息都来自知识工程师的大脑，并作了这样的总结："我们没有真正创造性的，真正发明性的，或是可以理解某人复杂的推理能力的程序①"。为了根本解决问题，就要研究思维科学，尤其是形象（直感）思维学。

通过以上讨论可以看出，模式识别这门新兴的技术科学与思维科学有密切的联系，能够为建立形象思维学提供丰富的素材。同时，思维科学的研究成果（比如，如何把经验和推理结合起来这类问题的研究成果），对于模式识别及专家系统的发展将起指导性的作用。

---

① Tai, J. W(戴汝为), and Fu, K. S(傅京孙). Semantic Syntax, Directed Translation for Pictorial Pattern Recognition, 1982

3 智能控制系统[1]

3.1 引言

“智能控制系统”的说法是美国 K. S. Fu(傅京孙)于 20 世纪 70 年代初提出来的[2][3],早在 1965 年他提出把人工智能的启发式推理规则用于学习系统,1971 年他及其同事在对几个与自学习系统有关的领域进行研究后,为了强调问题求解与决策能力,采用了“智能控制系统”来概括这些领域中所面临的系统。K. S. Fu 在国际上以句法模式识别工作著称,早期从事自动控制方面的工作,他是最早理解到人工智能与自动控制的交叉关系的人。到了 1989 年在底特律举行第 11 届国际人工智能联合会议时[4],人工智能与系统科学相结合不但是众所周知,而且已经取得了丰硕成果。

智能控制开始成为一个新的学科的标志是 1987 年在费城举行的第一次国际智能控制会议。许多原来从事自动控制系统或自动控制理论的工作者,在进一步探索自动控制与其他领域的交叉及交叉发展的关系,提出自动控制、人工智能、运筹学相结合或自动控制、人工智能、运筹学和信息论相结合的说法[5][6]。

自动控制系统是一类系统,而系统在自然界和人类社会中是曾遍存在的。人造系统与人参与在其中的系统是很不一样的。以往在工程领域内的人造系统大致可归结为控制系统与信息系统两类,虽然两者之间并不能截然分开。早期的控制系统是以某一种物理对象或过程作为被控制对象,然后再设计某种控制回路,利用反馈等手段来形成闭合回路系统。在这种系统中对象及系统可以用定量的方法,如用各种形式的微分方程来描述或进行模拟,所以系统的行为即系统状态随时间而变化是

---

① 戴汝为. 智能控制系统. 模式识别与人工智能,1990,3(3)

② K,S. Fu. et. al. A Heuristic Approach to Reinforcement Learning Control Systems,IEEE Trans,1965,Vol AC-10(4)

③ K,S. Fu. Learning Control Systems and Intelligent Control Systems:A Intersection of Artificial Intelligence and Automatic Control,IEEE Trans,1971,Vol AC-16(1)

④ 戴汝为. 第十一届国际人工智能联合会议简介. 模式识别与人工智能,1989,4

⑤ H,L. 德雷福斯. 计算机不能做什么. 北京生活. 读书. 新知三联书店,1986

⑥ G,N. Sarids. Toward the Realization of Intelligent Controls,Proc,of IEEE,1979,67(8)

至关重要的，强调的是系统的动态性能。但这类控制系统比较“僵化”，没有适应环境变化的能力，所以以后进而发展到最优控制系统、自适应控制系统等，并为研究控制系统建立了经典的控制理论与现代控制理论。另一类是信息系统，这是随着计算机的发展，可以用计算机来进行信息处理而形成的系统，如图像处理、模式分类系统，通过光电扫描把图像送入系统，系统的输出也是一幅图像，例如一幅有噪声，模糊不清的图像，经过系统后变成一幅去掉噪声而且清晰的图像。在这样的系统中，是通过一些运算来对图像的基本单元象素进行运算，强调的不是系统的动态特性，也不一定是闭路系统，而是模式信息处理。一般而言，控制系统或信息系统几乎都是一个与外界不发生关系的系统，也就是自成一统的封闭式系统。

人类经过长期的生产实践和社会发展，已经比较成功地做到用机器来代替体力劳动的职能，花样繁多的机械装置和早期以弱电信号对强电及机械装置的控制所构成的自动控制系统，大大减轻了人的体力劳动。但人们又看到上述人造系统的局限性，于是致力于研究用机器来代替人的脑力劳动部分职能，研究模拟智能的人工智能。这是件非常困难的工作。当前人工智能与人的智能间的差距还太大，但人们对智能技术寄予的期望很大，所以“智能控制系统”的研究自然又引起人们的关注。关于智能控制，一般的说法是在原来控制系统的基础上加上一两个“智能”环节，或者对于控制对象的情况了解甚少的情况下，采用人工智能或知识工程中提出的方法与技术来构成控制系统，或者把以往的控制系统从概念上加以拓广，认为系统由组织级、协调级和执行级三级组成。组织级以知识表达及知识处理的方式反映了系统的主导思想，属于一个人工智能的环节；协调级的作用是连接组织级与执行级，执行级是最低层次，与一般控制系统的执行机构相类似①。可以看出，以往关于智能控制系统的说法由于受传统自动控制系统的影响，所以未能给出一个清楚的描述，更主要的是不清楚主要问题所在，以及应该着重从哪些方面来进行研究。这里用刚提出的开放复杂巨系统及其方法论②的观点对智能控制系统、人机交互系统以及社会系统进行了讨论。阐明智能控制系统是一类人机交互系统，属于开放复杂巨系统的范畴。人工的智能控制系统是对开放的复杂巨系统的一种近似。

3.2 系统的分类与开放的复杂巨系统③

分析所遇到的各种系统，概而言之，不外乎自然系统以及人所制造出来的人工

---

① G,N. Sarids. Toward the Realization of Intelligent Controls,Proc,of IEEE,1979,67(8)

② 张仲俊、蔡自兴. 智能控制与智能控制系统. 信息与控制,1989,5

③ 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990,13(1)

系统两大类。再进一步，根据组成系统的子系统种类的多少和它们之间的关联关系的复杂程度又可以把自然系统和人工系统的每类再分为简单系统及巨系统两类，即：

（1）简单系统。组成系统的子系统数量比较少，子系统之间的关系比较单纯。如一个温度控制系统就是一个人工简单系统。

（2）巨系统。组成系统的子系统数量非常大，成亿、上百亿，亿亿。如果系统中子系统的种类不太多，而且它们之间的关联关系又比较简单，则称为简单巨系统。如果子系统的种类很多，并且有层次结构，子系统之间的关系又很复杂，就称为复杂巨系统。如果系统又是开放的，开放是指系统与系统中的子系统分别与外界有各种信息交换，系统中的各子系统能够通过与周围环境的交互作用而增加适应的能力，这种系统就称为开放复杂巨系统，例如生物体系统、人脑系统。大多数的人造系统都是简单系统，如一般的控制系统或信息系统，而且不具有开放性。就是自动化工厂也只不过是人工的大系统而已。至于开放复杂巨系统，这种系统无论在结构、功能、行为方面都很复杂，以至于到今天还有大量问题我们不清楚。上述的分类可用图 3-1 表示。

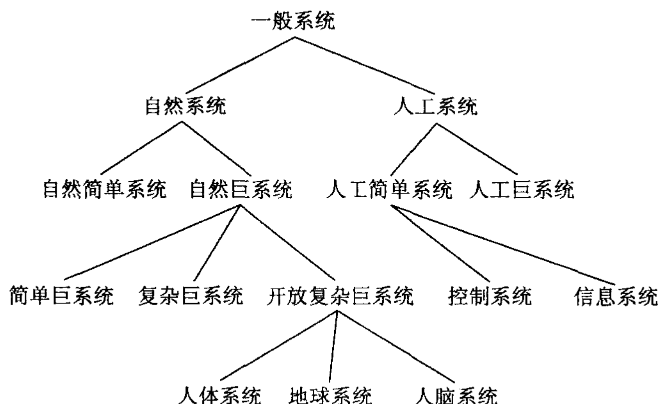


图 3-1　系统的分类

如果一个系统中包含人作为子系统，系统中某些决策与控制或识别等功能是通过人脑来完成，例如用人来对一个简单的对象进行监视或控制，由于是靠人脑起作用，表面上看起来系统的结构很简单。实际上这样的系统已经属于开放复杂巨系统的范畴，通过人脑具有高度的开放性，虽然系统的功能未必高明，但从性质上来说与一般的人工系统有本质的区别。

图 3-1 的分类方法主要是为了把问题说清楚。实际上许多系统是自然系统和人工系统组合而成的系统。尤其，人和由人造出来的计算机都作为系统中的主要组成部分，这时所构成的人机系统就是人工系统和自然系统中的人脑系统相结合的一

种系统。总之，可以认为智能控制系统是人工简单系统、人工大系统与人脑系统组台起来而构成的系统，是开放复杂巨系统。

3.3 智能控制系统

通过以上讨论，我们可以把人脑系统与人工系统两者结合起来而构成的系统称之为“智能系统”，这里说的“智能”是指人具有的智能行为。人工系统中两种简单的系统分别为控制系统与信息系统，所以很自然地把人作为系统中的一个子系统时就形成智能控制系统与智能信息系统。应该强调的是，有人参加的系统已经是开放的复杂巨系统而不是简单系统了，尽管人在系统中也许起的作用似乎并不十分明显。如果我们对历史进行回顾，1971 年傅京孙在“学习的控制系统与智能控制系统”中所论述的三个智能控制领域是：①以人起控制装置作用的控制系统有关领域；②以人机交互方式起控制装置作用的控制系统有关领域；③自主(autonomous)的机器人系统有关领域。前两个系统都是人直接参与到系统中。这样的智能控制系统，它的特点没有得到充分的说明与表达。对于自主的机器人系统，是一种人不直接参与的系统，但设计者期望这样的系统具有某种智能行为。其实，对于第①、第②两个领域，很自然地会提出这样的问题：是否能用一个人造的子系统来代替人这个子系统，形成不用人参与的自动控制系统。实际上就是模拟人的智能行为，这就是人工智能领域中所追求的目标，也就意味着将系统科学与人工智能相结合。用人工子系统来代替人所形成的系统，说得确切一些，是“人工的智能控制系统”。按照图 3-1 的分类，这一类型的系统属于人工系统，就目前人工智能所取得的成就及计算技术水平，只是属于简单系统的范畴，例如对炼铁炉的控制可以通过有经验的老工人对火焰的观察以及老工人的经验知识加以控制。目前已经可以利用知识工程中的结果，研制一个专家系统来代替老工人，再配合一些观察和检测火焰信息的仪表，就形成一个人工的系统。

总之，按照系统的分类，我们可以归纳出如下结论：

(1) 智能控制系统是一类人机交互系统，属于开放复杂巨系统的范畴。

(2) 人工的智能控制系统属于简单系统范畴，因为人脑的复杂程度现在是无法人造的。

(3) 实现某种人工的智能控制系统实际上是以简单系统来实现对开放复杂巨系统的某种近似。

上述第三点对于智能控制的研究有重要的意义。谈到近似，就面对着近似程度好坏的问题。随着对所要达到的目标，即对开放的复杂巨系统及其方法论的了解越深入，那么对如何才能使近似程度较好就会有所启迪与帮助。

从开放的复杂巨系统的观点，用人工的子系统来近似人脑系统的小部分功能，

以下几点是值得注意的：

(1) 模型的建立。以往自动控制领域内的系统模型，往往是定量模型，要为人这样的子系统建立模型，是极为复杂的问题，看来只能是一种定性的模型，所以不仅要研究定量模型，还要着重研究定性模型，并解决不同模型之间的互相作用问题。

(2) 高度的开放性。只有系统与系统中的子系统能够与周围环境进行信息交换，具有一定程度的开放性，并能通过学习获取知识，并改变系统的结构，这样的系统才能变得灵活和具有适应的能力。

(3) 推理与直感。系统是知识型的系统，系统中的某些子系统具有能利用知识和进行推理的功能，以及某种类似于直感的功能。

总之，人工的智能控制系统的设计应考虑到系统必须是开放的、具有一定知识信息处理能力的系统。

通过以上讨论，可以明确地把智能控制系统分成两种类型：

(1) 属于人机交互类型的智能控制系统，让机器做人的助手。

(2) 作为智能控制系统的一种近似的人工智能控制系统，让机器做人的高级助手。

3.4　智能的模拟

人工的智能控制系统研究的核心问题是根据对系统的要求，如何用人工的子系统来模拟人脑的智能行为以达到系统的设计要求。这与人工智能领域中所追求的目标没有什么区别，只不过前者把智能行为限制在巧妙地起到控制作用的狭窄范围内而已。可以说系统设计中的焦点在于'智能"上，而系统结构等是随之派生出来的问题。人工的智能控制系统的研究与人工智能是紧密联系而无法分开的。近 30 年来人工智能发展的教训也是值得人工的智能控制系统的研究吸取的。

从宏观上对人类智能行为进行模拟，概而言之就是模拟人的思维活动①。人工智能也就是用计算机来模拟智能行为的研究领域，是 1956 年麦卡锡，明斯基等组织的一个讨论会上提出的。随后作了一系列的工作，如 1956 年证明了罗素《数学原理》中的 38 个定理；同年塞缪尔等编制了一套下棋的程序，并在 1962 年打败了一个跳棋冠军；1960 年研究出用于符号处理的计算机语言。面对这些工作，当时有的专家就给出了乐观的估计②并预测：

(1) 10 年内数字计算机将是世界冠军。

(2) 10 年内计算机将证明一个未发现的重要的数学定理。

① 尹红风，戴汝为. 论思维及模拟智能. 计算机研究与进展，1990，1

② H，L. 德雷福斯. 计算机不能做什么. 北京生活. 读书. 新知三联书店，1986

(3) 10 年内数字计算机将谱写具有美学价值且为批评家所认可的乐曲。

(4) 10 年内大多数心理学理论将采用计算机程序的形式。

这些预言至今未见任何实现希望,而进一步发展下去又出现更多困难。以人的智能行为作为参照,那么可以说人工智能 30 多年来取得的成就甚微。即使在人工智能发展史上被说成有突破性的进展,与人的智能行为相比也说不上有什么进展。至于人工智能中的知识工程已经有了许多应用,十分引人注意,但分析现有的专家系统,实际上只是一种简单的系统,其功能与作用根本无法与开放复杂巨系统相比。一些专家们越来越感到:"人工智能问题是科学中所遇到的最难的一个"。1988 年底,在东京举行的日本五代机会议上美国的司马贺应邀在会上报告,一开头就说了一段意味深长的话①,"从一开始,人工智能和认知科学的工作者就因过分的乐观而受人指责。我希望,我们已为某些乐观而感到内疚了。面对于一个经历了 30 年历程才走到今天这一步的一个领域来说,我也不认为这种指责和内疚是过分的"。人工智能之所以走过这样的路与当时的人们对思维与智能认识不足,对用机器模拟人的智能行为艰巨性认识不足,主要是对人脑的超级复杂性认识不足,而近年来脑科学取得的进展说明人脑好比是 10^{12} 台 Cray 巨型计算机并联起来的网络!因此没有下极大的功夫进行基本问题的研究,与在指导思想上的错误有关系。对于人工智能的研究,当然也是对人工的智能控制系统的研究,踏踏实实地在理论方面下功夫是十分必要的。我们主张人工智能的发展应走理论与实践相结合的道路;既要通过大量实践,解决具体的实际问题,又要建立理论以指导实践,这是马克思主义哲学指导下的唯一科学道路。

模拟智能的研究有着广泛的应用前景。模拟逻辑思维和形象思维,并不是以人脑的物质基础为起点,即走脑科学的道路,虽然好像这条道路是最根本的。目前人们对大脑的认识还有限,过去脑科学家们把占脑一半以上的神经胶质细胞忽略不考虑,只注意到神经元,现在发现原来胶质细胞也有重要作用,可见对于脑连其基本结构和其组成部件之间的相互作用还不清楚,所以现阶段还不能作为研究思维和模拟智能的基础,只能从思维科学的观点,靠我们从宏观上猜测思维现象,建立一些对思维的猜测模型,用思维科学内部的一些方法来研究、建立模型。正像研究物质结构当然可以深入到基本粒子、夸克,但多少年来化学还是化学,不必越过学科划分,进入基本粒子物理学的领域,也不必把所有的基本粒子都研究清楚后才能开始化学的研究②。

---

① H, A. Simon. Prospects for Cognitive Science, Proc, International Conference on Fifth Generation Computer Systems, 1988

② 钱学森. 关于思维科学. 上海人民出版社, 1986

3.5　人机交互系统

在计算机技术的发展已经取得辉煌成就的今天,计算速度达到每秒亿次,并且具有推理功能,推理功能达到每秒几千万次而且有较方便的人机接口的计算机工作站已经是不难得到的商品了,但计算机作为一个系统所具有的开放性仍然是很差的,通过程序进行学习的能力很差,不能向周围环境中获取知识,更不要说像人那样能利用知识了。计算机充其量只是一个大系统,但计算机有它的长处,如计算速度和推理速度之高是人望尘莫及的。现在已经越来越清楚,盲目的追求自动化,一切都要求机器来完成,既不现实也不合理。合理的设想是既发挥人的长处又发挥计算机的长处,由人和机器来共同完成所需要达到的某种目的,这种构思已为实践证明是行之有效的。人机交互系统比起早期所说的那种以人作为子系统起控制作用,或以人机交互方式起控制作用的系统来说,已经大大地拓广了。可以设想,在一个人和计算机协调进行工作的系统中,一些繁重的推演和计算,或者可以形式化地加以解决的事务,由机器来定量地加以解决,而人则利用人脑具有高度开放性和知识处理等功能,在一些支持环境的帮助下,在关键之处给予定性的决策和处理。人与机器互相弥补,充分发挥各自的长处,要做到这一点,还需要人和机器互相靠近,也就是说要求人比较容易与机器进行通讯与交流信息,这就需要方便的人机接口。以往最一般的人机通讯是利用键盘输入,通过程序来实现人机通讯,在软件工程方法方面,人与机器对话这一子系统是作为软件的一个模块来加以设计,使用户接口的设计与应用程序的设计分开,具有独立性。如果面对大量的用户,那么如何设计好这一模块就需要考虑大量的人的因素(human factors)问题。实际上那是人向机器靠近,机器的开放性太差。为了使机器向人靠近,变得开放一些,就要加强人机接口的功能。对人来说,用图形或图像信息是很自然的事,所以采用模式识别技术,使机器能识别图形、文字,声音,或理解汉语等自然语言,并能以图形、文字、声音及自然语言作为输出,这样才能形成灵活而又和谐的系统。这样的系统是典型的智能系统,属于开放复杂巨系统的范畴,它的性能比简单巨系统要强得多,是最有发展前途的系统。现在已经很清楚地看到研究开放复杂巨系统及其方法论的重要意义。建立开放复杂巨系统的理论,实际上也就奠定了人机交互系统的基础。

人机系统可以用来解决各种问题,对于一个小问题,由一个人与一个计算机构成的系统就可以解决。在处理复杂的问题时,当然不局限于一个人、一个计算机的系统。对于具有许多人、许多计算机构成的系统,人和人、人和计算机、计算机和计算机之间都存在着通讯和相互作用的关系,互相间的作用是错综复杂的。前面已经谈过,在现有的计算机上,采用一定的程序也可以形成一种智能系统,例如专家系统就是一个例子,所以这样的系统也可以考虑为一个多少具有点智能行为的单元。近

年来人工智能领域中一个新的分支——分布式人工智能(Distributed Artificial Intelligence,简称DAI)就是研究有多个作用单元(agent)的情况下,作用单元之间的通讯、相互作用以及协调运行以达到预定的要求等有关问题。至于除了利用知识工程中的一些结果外,还提不出系统的方法来研究分布式的人工智能系统。如果把人考虑为一个作用单元,把计算机加上相应的软件所构成的专家系统也考虑为一个作用单元,大量这样的单元构成的系统就是社会系统。由于人本身就是一个开放的复杂巨系统,由人作为子系统构成的社会系统就成为一个层次更高的系统,我们称之为开放的特殊复杂巨系统。我们知道,系统科学思想的一个重要内容是处理复杂行为的定量方法学,是科学理论、经验和专家判断力的结合,是半经验半理论的,就建立系统或系统中的子系统的模型而言,首先由专家提出经验性的假设(猜想或判断),这不能用严谨的方式加以证明,但可以用经验数据检验是否正确,从经验性假设出发,通过定量途径获得的结论,仍然属于半经验半理论。在人们用定量方法处理复杂系统时容易注重于数学模型的结构与逻辑表达,而忽视数学微妙的经验含义或解释,表面上看来"理论性"很强,其实往往牵强附会,不能反映真实情况,与其如此,倒不如从建模的一开始就承认理论不足,而求援予经验判断。让定性的假设与定量的处理结合起来,能够加以形式化上升为理论的东西就可以用计算机来处理。经验性的假设,半经验的东西难以形式化,或者根本不能形式化,只能靠人来解决,这就必然要采取人机交互系统来实现。不仅对于数学模型的建立是这样,已经通过实践概括出能有效处理开放的复杂巨系统(包括社会系统)的方法就是从定性到定量的综合集成方法,这个方法就其实质而言,是将专家群体(各种有关的专家)、数据和各种信息与计算机技术有机地结合起来,把各种学科理论和人的经验知识结合起来,这三者本身也构成一个系统。这种方法的应用就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势。我们还可以进一步理解所谓定性的东西,即现在的各式各样的"专家系统",综合集成则靠人来综合这些"专家系统",也就是变成定量的、更完善的系统。这种系统还有不足,仍要靠人。从定性到定量的综合集成方法需要通过人机交互的方式来实现,对人机系统的运行起着指导作用,从而保证系统达到所期望的性能或给出合理的结论。很明显,从定性到定量的综合集成方法是研究开放复杂巨系统的方法,也是研究智能控制系统的有效方法。

4 智能系统的综合集成[①]

4.1 引言

人工智能(AI)30余年的历史,从研制自主系统(autonomous system)到对人类思维的探索,均是以"还原论"作为其研究方法论的。近几年,AI研究者,特别是一些在AI界令人尊敬的著名学者已离开或准备离开传统AI研究的方法论——"还原论"之路,他们已经在考虑为AI开凿一条基于"进化论"的新路,我们强烈地感到变革前夜的气氛。Minsky认为:"我们应该从生物学而不是物理学受到启示,……[②]"进而他提出了"从上到下"与"自下而上(top-down and bottom-up)"两种策略的综合集成方法[③]。Simon则考虑,"在计算机科学中,我们永不会有运动三定律(牛顿三定律),……[④]"。Newell强烈呼吁建立集成智能系统(integrated intelligent system)[⑤]"。

总之,他们均不相信存在着最基本的像物理学那样简洁的普适理论,而相反他们认为AI的理论一定是多彩、各司其职且互相协作的小理论的集合。正是基于对AI这样的认识,综合集成方法成为目前AI研究的重要课题。事实上自从1977年Feigenbaum提出知识工程的概念之后[⑥],在一个系统中,因问题需要而同时使用多种模型已不是什么稀奇的事。近几年,AI研究者已为研制巨型智能系统提出了大量的方案,尽管综合集成均作为这些研究的宗旨,但在方法论上却有重大区别。这些研究可被概括为如下四类:

4.1.1 封闭的巨型智能系统

CYC计划(EnCYClopedia 百科全书)是这个方案的代表。这个计划的执行者

---

① 戴汝为,王珏. 关于智能系统的综合集成. 科学通报,1993,38(14)

② Minsky. M. AI Magazine,1991,Summer

③ Minsky. M. The Society of Mind,Simon&Schuster,Newyork,1987

④ Simon,H. A. The 2nd International Workshop on AI in Economics and Management,1989

⑤ Willich. P. Scienticfic American,1991,265(6)

⑥ Feigenbaum,E. A. IJCAI 5,1977

认为目前智能系统缺少智能是因为其所包含的知识太少，因此他们设想如果在一个智能系统中包含100万条有机组织起来的知识[①]，则其就可能表现出智能行为，为此他们提出了知识的阀值理论[②]。CYC就是实现这个设想的一个庞大计划。

4.1.2 半封闭的巨型智能系统

Herath则考虑到以往一些研究智能系统与技术的团体，由于兴趣的不同，分成不同的小领域，如把在这些小领域发展出来的技术集中在一起就可以形成更有效的技术，从而发展超大规模集成智能系统(very large scale integrated intelligent sytems)[③]。

4.1.3 半开放的巨型智能系统

Hewitt认为智能行为不仅取决于个体的发育，更重要的是在社会环境中个体的相互作用的结果，即解决矛盾的过程。因此，这类系统的特点是允许在系统中存在矛盾，并可在系统的执行中消除矛盾。为此，Hewitt提出了开放语义信息系统的理论框架[④]。

4.1.4 开放的巨型智能系统

钱学森的从定性到定量综合集成研讨厅设想是基于开放复杂巨系统理论的另一类研制巨型智能系统的方案。这种方案不仅需要考虑在系统中出现矛盾时处理的办法，而且人将作为智能系统中的成员而被综合集成。实施这个方案时，系统科学的理论将起重要作用[⑤]。

本文着重考虑智能存在着的不精确处理与精确处理两重性。智能行为恰恰是不精确处理与精确处理两者综合集成的结果。本文提出了一类综合集成方法，它包含三个方面的内容：① 研究在计算、模型、感知及认知等不同方面上综合集成的方法；② 根据实际环境及综合集成的需要，创造新的表达、推理及学习的方法，这些方法也是综合集成的必然产物；③ 强调在智能系统中人作为被综合集成对象的重要性，其本质是改变对完全“自主”系统的追求成为研制以人机协作为目标的智能系统。

---

① Minsky. M(ed). Semantic Information Processing MIT Press, 1968

② Kirsh. D. AI, 1991, 47(1－3)

③ Herath. J. Computer, 1992, 25(5)

④ Kirsh. D. AI, 1991, 47(1 -3)

⑤ 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，13(1)

总之，从 AI 中对四类巨型智能系统的总结，可以得出如下结论：智能问题的研究要突破近代科学基于“还原论”方法论的束缚，接受从定性到定量综合集成的方法论(methodology of metasynthesis from qualitative to quantitative)是必然的。通过研制新型计算机来追求实现“自主”智能系统的构思已为 30 多年来的历史证明是难以完全奏效、或是不必要的。相反，恰恰需要研究的是人与机器相结合的智能系统的综合集成。

4.2 “个性”设计与普适理论——发展过程的回顾

当回顾 AI 发展的历史时，我们发现可将这个历史分成三个阶段：① 智能模拟的提出；② 智能模拟普适理论的研究；③ 智能模拟的“个性”设计。本节将分别讨论这三个阶段在 AI 发展中的作用。

4.2.1 智能模拟的提出

近代对智能模拟的认真考虑应是 40 余年前 A. Turing，N. Wiener 及 C. Shannon 等为代表的工作。他们从不同角度研究了思维的机制，并给后人分别发展成为计算机科学，控制论及信息论。而 Turing 给出的著名的行为主义的实验，则成为机器具有智能的判别方法之一。由于历史与技术的局限，特别是随着物理符号机制的兴起，Wiener 的控制论及 Shannon 的信息论没有成为近代人工智能的基础。当我们回顾 AI 的历史时，这个阶段可看做是近代 AI 历史的起点。

4.2.2 智能模拟普适理论的研究

“人工智能”这个词在 1956 年正式提出前后，有几项工作曾对 AI 的诞生与发展有过重大的影响①。在这个阶段 AI 的研究是以探索智能及智能模拟的普适理论为主要目标的。这些理论均如此漂亮，以致人们对 AI 充满了希望。不幸的是，这一阶段 AI 的指导思想现在有些已被证明是错误的，典型的例子是：

(1) 对 AI 的追求是完全取代人，甚至相信 10 年内可实现电子秘书②③。

(2) 假设在微世界所得到的研究成果可以向实际世界推广④。

(3) 完全忽视了控制论及信息论中的一些思想，忽视了对模拟量在 AI 中作用

---

① 戴汝为，王珏. 关于智能系统的综合集成. 中国科学院自动化研究所技术报告，1992

② Dreyfus. H. 计算机不能做什么(中译本). 北京生活·读书·新知三联书店，1986

③ Simon，H. A. Proceddings of the International Conference on Fifth Generation Computer System，1988

④ Minsky. M(ed). Semantic Information Processing MIT Press，1968

的研究。

(4)"还原论"的方法统治了 AI 的研究，由此忽略了对智能中"个性"特征的探索。

4.2.3 智能模拟的"个性"设计

在这个时期另一些研究者强调事物的"个性"在智能研究中的重要性，他们不相信仅有普适的理论及方法就可完成智能模拟的任务；相反，他们认为对"个性"的研究者是推动研究进展的条件，因而他们更关心如何有效地为"个性"进行设计。这包含两个内容：其一为集成，即将因事而异而使用的不同描述有机地构造起来以形成一个系统；其二是综合，即对为了满足技术上的限制研究者不得不采用随意描述的方法进行抽象及分析(例如，优缺点分析等)以形成新的模型。在 AI 的发展历程中，与此有关的典型工作可在文献[①]中发现。

4.2.4 集成与综合

综上所述，AI 的发展可以认为是从研究思维的本质开始，在技术条件的约束下不断批判与总结的过程。而这个过程又分成探索普适理论及发展"个性"设计两个阶段，当人们认识到"个性"在思维中的作用时，综合集成方法论的产生就是必然的。

进入 20 世纪 80 年代后为了探索综合集成，AI 研究者对 AI 的现状进行了各种各样的总结及分析，特别是近 5 年来国际 AI 杂志出版了 8 本专辑，从中我们可以看到国际上对 AI 研究总结的方方面面及感受到取优舍劣为形成综合集成局面所作的努力。

以上对 AI 的发展进程进行讨论，其目的就是为了从历史中吸取教训及营养，进而寻求合理的研究方法及理论。我们已经明确地认识到 AI 的理论基础就是思维科学中的思维学[②]。

4.3 "感受"与知识

知识与智能在常识意义上是"知识越多，系统越有智能"。但在 AI 的研究中往往又可以听到现在的 AI 系统是"知识越多，系统越慢(笨)"的说法。除了搜索的原因之外，还有什么原因。为此首先列出柏拉图对知识的说法。柏拉图对知识的说法是：所有知识都必须可用任何人都能用的清晰定义来描述。如果某人不能用这种清晰的指令来表述他的技能——如果他知其然不知其所以然，那就不是知识，而不过

① 戴汝为，王珏. 关于智能系统的综合集成. 中国科学院自动化研究所技术报告，1992

② 钱学森主编. 关于思维科学. 上海人民出版社，1986

是感受。我们可以把这段话理解为:“感受”是定性的、非精确的,它属于非理性范畴,而知识则是可定量,可用“清晰的指令来表述”的,它属于理性范畴。

在 AI 系统中真正决定其成功与否,真正使其表现出某种智能行为的恰恰是这种“感受”。AI 研究者从通用问题求解器(GPS)的研究开始就知道,这种具有非确定性并可处理例外的“感受”在 AI 中的作用,但传统物理符号方法则要求,这种非确定性及例外“必须能以清晰的指令来表示”。这是知识越多,系统越慢的另一个更本质的原因。

为了解决这个矛盾,重新认识系统的智能行为是必要的,Minsy 在他的著作《The Society of Mind》中对智能作了如下说明:“我们的智力(mind)包含了能使我们解决认为困难问题的过程,智能(intelligence)是我们仍不了解的那些过程的统称”。对这个说明的注解是:智力包含在“知其然”中,而智能却表现在处理“知其然而不知其所以然”的过程中。

“感受”没有独立的结构,它的结构甚至它的存在,均依赖于与其有关的知识。例如人们只能说与几何定量证明有关的“感受”。当知识消失时,这些“感受”也随之失去其存在的意义。因此孤立地谈“感受”的描述是没有意义的。“感受”是对实际世界的各种描述(包括陈述及过程)综合集成的结果。例如平面几何定量可以利用图形及文字来描述,对几何定理的理解过程就是将图描述与文字描述的综合集成。由此下述猜想可能成立:智能行为表现在“感受”之中,“感受”是知识(与以前的“感受”)综合集成的产物。

总之,知识固然是表现智能行为上是十分重要的,但对“感受”的研究则涉及 AI 的成败。如果说知识的描述与 Minsky 的“从上到下”策略有关,则“感受”的描述将取决于与“自下而上”策略的研究结果。因此 Minsky 的“自下而上”是一类更复杂的问题,它与综合集成方法密切相关。最后,顺便提一句,“感受”与形象思维有很深的关系,本节对“感受”所作的分析也适合形象思维。对汉字识别的研究是一个好的例子①。

4.4　联接机制与物理符号机制

尽管联接机制与物理符号机制的基本原则在 20 世纪 60 年代就已提出,但这两个概念正式使用却是 80 年代的事了。讨论联接机制与物理符号机制的综合集成是取决于对它们优缺点的分析。基于物理符号 AI 的优缺点已被充分地讨论过。总体来说,它的优点是可以做推理,缺点则是只能做精确推理,隶属于它的任何非确定性

---

① Tai,J. W(戴汝为),Liu,Y. J.(刘迎健)、Zhang,L. Q(张立清). From Pixels to Feature (eds,Impedovo. S、Simon. J),North-Holland,1992

理论，均是以事先对局部评价可精确化为条件的。例如，贝叶斯决策需事先确定事件的先验概率。尽管这个机制可以完成非常复杂、只有受过长期严格训练的人才能完成的任务，但却在动物依赖本能也能完成的行为上束手无策。即，对“感受”的描述及使用无能为力。这个缺点是非常本质的，因为它事实上与搜索中的“组合爆炸”及不确定(常识)知识的获取等 AI 的关键问题直接有关。我们试图利用联接机制来解决这个问题，以便形成物理符号 AI 与联接 AI 的互补局面。为此分析联接机制的优缺点就变得十分紧迫，特别是它的弱点。联接机制的优点是它可以采用极简单的结构，表示非确定性世界中的实体。它的弱点是：① 就表示而言，联接机制的结构不够灵活；② 泛化(generalization)不可定量描述；③ 在学习时将遇到其计算复杂性是 NP 问题；④ 在显示其智能行为的方式中，联接机制可模拟人类所采用的“举例说明”作为对“只可意会”推理的解释，但离可以真正实用还有很长的一段距离。我们提出以下几个可能应用这两个最基本的机制进行综合集成的例子。

【例 1】 逻辑与人工神经网络在历史上关系是十分密切的，mcCulloch 与 Pitts (MP)模型是典型的例子[①]。MP 模型可被写为

$$\text{Greater}(X,\theta),$$

$$\text{Greater}(X,\theta)=\{T,\text{if } X\geqslant\theta\},$$

$$=\{F,\text{if } X<\theta\},$$

$$X-\Sigma w_i v_i,$$

其中 w_i 为网络的权，v_i 为输入矢量中的一个变量。

这就是至今还在使用进行分布知识表示的模型，加以改善后可与基于物理符号模型结合起来。

【例 2】 将基于心理学激励-反应模型的逻辑表示加以扩展使其包括联接机制的联想记忆。由此建立一个包括联接机制联想计算的逻辑体系。这样可创立一个如下模型：

$$A_1 \wedge A_2 \cap \cdots \cap A_k \Rightarrow B_1 B_2 \vee \cdots \vee B_m,$$

并且

“$\Rightarrow$”被定义为 $B=f(W,A)$，

其中 W 为联接 A 与 B 的权，f 表示了 A 到 B 的一个非线性映射函数。

【例 3】 可以设想将隐含存储在联接网络中的某些知识在一定条件下抽象成一些显现的规则(即理性的知识)。

【例 4】 “举例说明”是人对问题解释的一个重要方法。利用单纯物理符号方法事实上是不可能做到这点，也是没有必要这样做的。而联接机制在理论上可以模拟“举例说明”。

---

① McCullach, W. S, Pitts. W. Bulletin of Mathematical Biophysis, 1943, 5

【例5】　集思广益是近几年AI研究的热点之一，它主要表现在分布式AI的研究中(DAI)其动机是为了将多个可能具有不同观察及不同知识背景专家的意见综合起来，以便得到问题的最好的解答。这个问题是如此复杂以致必须在一个更高的理论修养下考虑联接机制模型和物理符号机制模型的综合集成。

以上五个例子均涉及关于智能不同的方面的综合集成。事实上更多的例子可以给出。这些例子的中心思想是将不精确处理与精确处理结合起来。

4.5　反馈、自组织与搜索、推理

在40余年前，A. Turing与N. Wiener分别提出了人造智能行为的设想。两位学者从不同角度，利用不同的方法分别讨论了实现这种智能的途径。他们的思想成为计算机科学和控制论的基本点。

当这两位巨匠的思想被仔细地分析之后，我们会发现，计算机科学的基本操作之一是对离散数值信息的搜索，而控制论则还使用了基于连续量的反馈操作。遗憾的是在近50年中，由于计算机科学的蓬勃发展及连续量在计算机上表示的困难，使计算机学者基本上没有认真考虑控制论的思想对描述智能行为的意义。直到今天，两个机制的互补还是研究模拟智能行为的重要任务之一，这方面的尝试还不能说获得成功。智能行为来源于反馈？智能行为来源于搜索？还是智能行为来源于反馈与搜索的综合集成？我们这里似乎展现了机器模拟智能行为的两个极端：一个是Simon的心理实验所发现的搜索；另一个为Brooks“没有推理[①]”的智能所采用的反馈，对搜索的批评已为许多研究者所讨论，其关键问题是对不精确实体描述的困难及组合爆炸。而对Brooks工作的批评则像对他的研究赞扬一样引人注目，以下我们引出几条对Brooks工作的批评：

(1) Kirsh不相信Brooks的工作可以进化到理性的思维，他的批评文章以“今天的虫(erawig)，明天的人?”为题[②]。换句话说，Kirsh不相信Brooks的工作可以推广去研究认知问题。

(2) Nillson在批评这项工作时引用W. Anden的诗句：“不会推理的将在行动时消亡，而不会行动的则因此而消亡[③]”。

Nillson的批评则是针对Brooks文章中“没有推理”的说法。但作者不能完全同意Nillson的观点，因为在对感知描述使用显现(具有透明性)方式(称非整体表示或局部表示)无效时，谈基于逻辑的推理就是无米之炊(见4.3节关于“感受”的讨

---

① Brooks. R. ,IJCAI-91,1991

② Kirsh. D. AI,1991,47(1—3)

③ Willich. P. Scienticfic American,1991,265(6)

论)。

(3) Mitchell 则认为 Brooks 的观点更适合建造恒温器,而不是建造智能系统①。

这里最有趣的批评来自 Mitchell。恒温器恰恰是反馈系统的典型。那么 Brooks 的工作之所以被人认为是制作恒温器而不是智能系统——这充满贬义评价的原因,是由于其知识获取的过程与技术工人修理收音机没有什么两样。应该说 Brooks 利用反馈将系统放人实际环境及将人考虑为被综合集成的对象来获得知识是极其朴素,但也是 AI 研究者长期忽略的一个思想。它的重要性表现在可以回避搜索所遇到的一些问题。

鉴于 Brooks 工作对环境表示的局限性,使得我们不得不考虑这个基于工程整定的操作是否可以与搜索操作综合集成呢? 是否能在机器智能的两个极端方法的中间找到一个合理的可以取长补短的、新的机器智能模型呢? 回答这些问题是非常复杂的,但将人综合集成在系统之中是不可避免的。

4.6 人与计算机

一般说,计算机是一个能既快又好地精确处理(定量处理)信息的装置,但它不精确处理(定性处理)信息的能力却是有限的。另一方面,人处理精确信息的能力也是有限的,但人对非精确信息的处理则是非常高明的。人和计算机是在体系层次上表现智能行为的两个方面。这就是考虑在智能系统中将人作为被综合集成对象的原因。在 AI 中存在着的三类"人-机"方案:

4.6.1 自主系统

无论是 Turing 还是 Wiener 均是以自主系统作为他们研究智能的最终目标。而将人在机器生存期中的作用考虑为由于机器性能不完善而造成的不得已的补救措施。如果这种自主系统生活在"干净"的环境中,例如在月亮上建造自动收集及分析月亮天气及地质情况的系统,它将大有用处并可有效地生存。但如果它生存在充满人的地球环境中,保持其长生存期几乎是不可能的。人也许能制造出生活在月亮上的嫦娥,但却永远制造不出生活在编辑部里的蕾丝。

4.6.2 人帮机

"人帮机"系统的设计方针就是假设机器永不可能作到有较长的生存期,这意味着人将在两个方面起作用:① 人帮助机器摆脱目前的困境,例如机器人卡在椅子上,人帮它解决这困境并教它解脱方法;及② 在机器的运行时,如果让机器自主地

① Millich. P. Scienticfic American, 1991, 265(6)

解决一个困难的问题，可能将付出极大的代价，这时“人帮机”的策略将起着减少这个代价的作用。

4.6.3 人帮机，机帮人

在智能系统的生存期中，人与计算机为其同解决一个困难问题，根据自己的特长进行协作。人与计算机构成一个具有各种反馈的系统，在人与计算机的讨论，甚至“争论”中求到最好的解。实施这个方案需要解决两个方面的问题：人与计算机之间所使用语言的巨大差异是首先要解决的问题（界面问题），系统将需要语言、图形、声音及任何一种感知媒体的“人-机”通讯的突破性的研究成果。例如，灵境（virtual reality）技术[①]。另外，更重要的是人被综合集成时在体系上需要解决的问题，它将关系到“钱学森方案”的实现。

人被考虑为智能系统中的一个重要因素是有很多例子支持的。例如，在经济或军事决策中，制作智能系统可以有三个方案：

(1) 给出一组数据，智能系统自动地给出决策的结果（出主意），这就是“自主”方案。

(2) 在上述的决策过程中，当系统在决策的过程中出现问题，人帮助系统作出适当的选择，这个方案基本上还是系统出主意，但要加入人对问题的考虑，即“人帮机”方案。

(3) 人给出一个初步的想法（主意），系统对这个想法在现有条件下，验证它的合理性并预测可能的结果，再与人构成一个反馈，由人不断修改想法，最后得到可接受的解，即“人帮机，机帮人”方案。

事实上，实现“人-机智能系统”需要以上三个方案的综合集成，不同之处在于“人帮机，机帮人”方案将在问题求解的全局起作用，而“自主”方案与“人帮机”方案将在问题求解的局部起作用。

4.7 总结——互补策略

总之，可以说 AI 没有单一的、精彩的基础理论。AI 的基础理论是由“非理性”与理性两方面的“小理论”综合集成所构成的。为了实施这个原则，我们将上述讨论总结为互补策略（表 4-1）。

① 邱桂友（编辑）. 虚拟现实技术及其应用. 国家智能计算机研究开发中心，NCIC-TM92/02，1992

表 4-1 互补策略

层次名称	不精确(定性)处理	精确(定量)处理
认识层次	感受	知识
体系层次	人	计算机
表示层次	联接机制	物理符号机制
操作层次	反馈、自组织	搜索、推理

当仔细分析研究这个互补策略时,就会发现不精确处理和精确处理是核心问题。任何企图在智能模拟中建立不精确问题和精确处理统一理论的动机看来是没有必要的,因为它们是智能过程中所具有的两重性。AI 重要的是在不同层次上将各种模型综合集成起来并在综合集成的过程中创造新的模型。创造新的智能模拟是实现互补策略的核心问题之一。

互补策略是非常复杂的,借鉴别的学科的研究成果是必要的。例如,在感知处理上所碰到的困难,我们就怀疑是否可在搜索基础上得到解决,它的解决可能依赖于非线性科学。人是智能系统中的一个重要成员,这样人-机通讯就成为实现这个互补策略的必要条件。我们相信,智能行为将诞生在基于综合集成方法的系统之中!

5 巨型智能系统[1]

5.1 引言

近几年,AI 研究者深感传统 AI 理论及技术的局限性,从方法论到技术实现各个层次的反思已成为一种趋势,而其他各个学科对 AI 的批评与渗透则更促进了这个进程。在反思中,一方面是对 AI 研究中采用还原论的批评,目的是想纠正对 AI 不切实际的追求;另一方面则是考虑以往有几百条最多上千条规则的"自力"的紧耦合系统在表现智能行为方面的局限性。这样,考虑开展巨型智能系统研究就是自然的了。

当前,系统科学中复杂系统研究的一些理论与方法在 AI 领域中得到重视。AI 与社会系统工程的结合已成为一种必须加以重视的想法。20 世纪 90 年代初我国科学家钱学森提出了开放的复杂巨系统及其方法论,这是系统科学的一个重大发展。在此基础上,他又进一步提出创建从定性到定量综合集成研讨厅体系(hall for workshop of metasynthetic engineering)的方案,其构思是把人综合集成于系统之中,采取人机一体,以人为主的技术路线,致力于把今天世界上千百万人的聪明智慧和已经不在的古人的智慧全部综合起来,把人的思维、思维的成果,人的知识以及各种情报资料、信息统统集成起来(引自 1992 年 11 月 13 日钱学森一次谈话,这个想法与 Minsky 的"未来图书馆"与 Feigenbaum 的"国家知识库"的理想[2]是类似的)。本文把上述研讨厅体系归之为一类巨型智能系统,以便于与当前国际上的一些巨型智能系统相比较,对综合集成研讨厅体系的重要意义有所了解。这里的主要工作是从系统设计策略与(研制过程)系统结构(问题求解过程)两个方面将巨型智能系统研究方案划分为四类,并在分析了这些方案的特点之后,从系统的社会结构上给出这些方案的理论框架,从而概括出一个研究巨型智能系统方案的系列,这些方案是:

(1) 封闭巨型智能系统方案(例:大百科全书方案)。

(2) 半封闭巨型智能系统方案(例:公共知识载体方案)。

---

① 戴汝为,王珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报,1993,19(6)

② Feigenbaum, E. A. A Personal View of Expert Systems: Looking Back and Looking Ahead, Expert Systems with Application, 1992, 5

(3) 半开放巨型智能系统方案(例:开放信息系统语义方案)。

(4) 开放巨型智能系统方案(例:从定性到定量综合集成研讨厅方案)。

5.2 封闭与开放

封闭与开放的意义一般是指一个系统在求解实际问题时,与外部环境、与其他系统是否存在信息、能量及物质的交换。本文则是在此基础上给出一个把智能系统在研制过程及问题求解过程两方面加以引申的说明:无论在研制过程还是问题求解过程中“封闭”的智能系统就是一个“自力型”的系统;相反,“开放”的智能系统是一个“社会型”的系统。即“开放”的智能系统是一类“进化”的系统。

在封闭系统中,就系统设计而言,是对这个系统在表示、推理及知识库内容均存在一个公认的详尽准则,这个准则将在整个研制过程中起作用,也就是说必须保持系统的完整性与一致性;对问题求解过程,就是系统的结构是独立的。封闭型系统的追求是一个包括对整个世界的系统,而且相信这样的系统可在一定的准则下完整且一致地实现。封闭系统被分成两类——封闭型与半封闭型,它们的区别在于对系统的设计研制过程,封闭型是“自力型”的,半封闭型则是“社会型”的。

开放的智能系统是一个“社会型”的系统,对系统设计而言,它也需要一定的准则,但这些准则的意义仅仅相当于一个行业中的规则及必要的术语,而在“社会”中的“个体”则完全不可以有不同的个性。在设计过程中仅需考虑社会的结构,至于“个体”的结构则完全可由不同的研究小组较自由地完成(但应遵守社会所规定的准则),这点与半封闭系统类似。与封闭系统的本质差别在于系统结构,开放的系统只有在对具体问题求解时,才会动态地构成系统。开放系统是建立在“智能行为与社会行为相似”的假设基础上。开放系统也被分成两类——半开放型与开放型,它们之间的差别在于对社会中层次的认识与人在社会中的作用。

由于人在系统中的作用与关系涉及了智能系统的研究目标这一根本问题,因此,在国内外已引起了很多讨论及争论。钱学森于1991年初,在关于智能计算机长远目标的讨论中,提出:“我们要研究的是人与机器相结合的智能系统,不能把人排除在外,是一个人机智能系统”;并强调:“人始终发挥着主导的作用(引自钱学森1991年4月18日的一次谈话)”。在国外,Lenat与Feigenbaum在1991年也明确指出“人机合作预测”是知识系统的“第二个纪元”。他们提出“系统将使智能计算机与智能人之间成为一种同事关系,人与计算机各自都执行自己最擅长的任务,系统的智能是这种合作的产物。这种交互可能天衣无缝和极其自然,以至于技能、知识在哪里(在人的头脑中或在计算机的知识结构中)都没什么关系。断定智能在程序之中是不准确的。从这样的人机系统中将出现超过人的智能和能力。在这阈值之

外,有着我们如今无法想象的奇迹[①]"。

四类巨型智能系统一般说在理论、方法与技术上有一定的继承性,在封闭型系统研究中发展出来的基本机制,像大知识库的想法,对其他三类系统均是有益的。半封闭系统所强调的"自力"系统构造社会化的理论、方法与技术必将对开放类系统作出贡献。而半开放系统对辩论及社会结构(具体说就是分布 AI 系统)的研究必有益于基于系统理论的开放类系统的研究。

5.3 封闭巨型智能系统方案

可以认为封闭巨型智能系统方案的构思是专家系统研究的自然延伸,是对在专家系统研究中发生的"知识获取的困难"及"脆弱性"进行反思的结果。在这类巨型智能系统的研究中,AI 研究者选择了完全不同的指导原则。以 Newell 为代表的 SOAR 学派认为,智能系统的研究应找出产生智能行为的简洁严谨的原理作为其系统的核心,根据这些简洁的原理将能保证系统可以产生比原来系统稍稍复杂的行为,他们声称"这样,系统可以逐渐复杂起来,最终产生人的智能[②]"。这是"还原论"的指导思想。而以 Lenat,Feigenbaum 为代表的大百科全书(CYC)学派则认为,寻找简洁 AI 核心原理对 AI 来说还是很遥远的事,他们认为解决知识获取及脆弱性的关键在于系统应有足够的起码的一般性知识(这里是指大家公认的知识)。Newell 在去世前(1992)已认识到 SOAR 的不现实性,在他与记者的一次淡话中,强烈地表示,智能系统应走综合集成之路[③]。本节将只讨论 CYC 方案。

5.3.1 知识阈值理论

大百科全书学派的口号是"知识就是力量(Knowledge is power)",因此这个学派也称为知识学派。它是传统 AI 中知识工程思想的继承与发展的典范。他们对智能的理解是十分朴素且工程化:"智能就是在(一个从观察者的直觉上看)巨大的搜索空间中,迅速地找到一个满意解的能力"。因此他们认为启发式知识是体现智能的关键,而启发式知识的获取恰恰是传统专家系统失败的原因。当探讨这个原因时,他们考虑这是因为缺少必要的起码的一般性知识,因此为了解决这个问题,大百科全书计划提出建立一个具有大量一般性知识,就像大百科全书一样的大知识库,

① Lenat. D, and Feigenbaum, E. A. On the Thresholds of Knowledge, AI, 1991, 47

② Rosenbloom. P, Larid. J, Newell. A, and Mccarl. R. A Preliminary Analysis of the Soar Architecture as a Basis for Gereral Intelligence AI, 1991, 47

③ Willich. P. Silicon Babies, Scientific American, Dec, 1991

并由此提出了知识的阈值理论①。它包含了三个假设：

（1）知识原理假设。一个智能系统能够呈现出智能的理解与行为，是因为它具有且能使用某个领域及可能与这个领域有关的知识。大百科全书计划认为当前阻碍专家系统进展的原因不是系统所采用的控制策略及机制，而是知识，特别是一般性知识。

（2）广度假设。在专家系统的研究中发现，几乎所有这样的专家系统均存在着脆弱性的弱点。这与人类智能行为的差异是：人所使用的知识不仅仅包括领域的知识，还包括了一些一般性的知识及其他领域进行类比的能力。

（3）实验验证假设。大百科全书研究者在方法论上的口号是：实验必须依靠假设来驱动，理论仅仅是指南而不是主人。对一个问题过早地形式化只会掩盖系统将存在的问题，智能行为应表现在对意外的证伪之中。

5.3.2 大百科全书计划的理论框架②

1987 年 Lenat 与 Feigenbaum 发表了大百科全书计划。它的主要贡献在于解决一般性知识的选择及使用的问题。其理论框架可以归纳为：大百科全书是一个巨大的至少包括 100 万个 Frames 一般性知识的知识库系统。在这个巨大的知识库系统中有以下几个特点：

（1）智能行为取决于在系统中存在着大量的知识。

（2）一般性知识是解决系统的脆弱性的关键。

（3）知识的表示是显现的。

（4）系统具有推理的能力，类比推理可用来解决知识库的相关性及知识获取问题。

（5）知识的使用过程是搜索。

（6）智能系统应具有提出假设及证伪的能力。

（7）智能行为来源于实验-验证的过程。

封闭巨型智能系统研究的特点，从系统设计上讲，带有个人的色彩；从系统结构上讲，系统是一个整体。因此对实际问题求解的能力仅仅与系统自身有关。这个在设计过程与系统结构上的特点是称其为“封闭”系统的原因。

5.4 半封闭巨型智能系统方案

半封闭巨型智能系统其是一类从封闭到开放过渡型的巨型智能系统方案。引

① Lenat. D, and Feigenbaum, E. A. On the Thresholds of Knowledge, AI, 1991, 47

② Lenat. D, and Feigenbaum, E. A. On the Thresholds of Knowledge, AI, 1991, 47

发此种系统研究的原因在于智能系统中建立大知识库的需要及知识自动获取的困难。大型知识库系统研制的经验已经说明采用“自力”方式建立巨型智能系统必然消耗大量的人力与物力。为此在系统的建立过程中采用“社会”方式也许更为有效。这种“社会”方式的特点是：不同的人在不同的地点根据自己的特长与想法采用不同的方式及模型来建立不同的知识库，这些知识库在问题求解时可以和谐地解决一个复杂的问题。这些知识库应满足以下三个条件：① 对被求解问题各知识库是一致的；② 在功能上各知识库有较明显的分工（各尽其责）；③ 在问题求解中，需要且仅需要这些知识库。这三个条件是半封闭型系统与开放类系统的区别所在。

5.4.1　智能行为的社会性

计算机智能行为是社会性的还是自力性的？如果认为个体智能对解决复杂问题是决定性的，发展自力型的系统是合乎逻辑的，这就是“孤立”的专家系统；否则采用社会性方式就是合理的。尽管个体的智能是智能行为产生的基础，但是自力型系统的局限性是系统在研制与问题求解时均会遇到困难。因此采用社会系统工程方法来满足建立大知识库的需要及克服知识获取的困难也许是有效的出路，它具有“进化”的特征。如果将这个系统设计思想与 R1 系统设计思想[①]进行比较，可有以下几个明显的好处：① 设计过程是并行的；② 不同的子任务相对较小，由此可以减少大量人力与物力的消耗；③ 设计者只需要知道很少的协议，而不必详细了解其他子系统的细节；④ 在问题求解的过程中，可采用分布方式并行地完成较复杂的任务，而不必在程序设计中过多地考虑搜索空间及时间消耗。

目前对半封闭型系统的研究有两种不同的路线：其一，没有一个特定的领域，而是将各个不同的研究小组中已存在大量的根据个人喜好而发展出的系统有效地集成在一起；其二，则是认为这是 AI 的一个全新的课题，因此应该建立一些试验场，在一个被限制的领域中研究它的问题，以便为 AI 研究开创一个坚实的新方向[②]。从已有资料看，后者已完成了一些重要机制的研究，试验场已经建立，初步的试验已经完成。

5.4.2　公共知识载体的理论框架[③]

公共知识载体（knowledge-bus）设想是美国 Palo Alto 的几个 AI 研究小组的专

① McDermott. J. R1：A Rule-Based Configurer of Computer Systems，Tech，Rep，CMU-CS-80-119，1980

② Cutkosky. M，and Engelmore. R. et al. PACT：An Experinment in Integrating Concurrent Engineering Systems，Will be Published in IEEE Computer，1993

③ Feigenbaum，E. A. A Personal View of Expert Systems：Looking Back and Looking Ahead，Expert Systems with Application，1992，5

家在1992年提出的。从系统结构讲，这个思想是一类知识一致、被观测数据一致的分布式AI系统。公共知识载体可以归纳为以下的理论框架：

（1）公共知识载体上搭乘了一组知识库系统。

（2）知识库系统是“孤立”的（在设计及求解中均是“孤立”的）。

（3）所有知识库系统均遵守一定的准则。

（4）所有知识库系统是公共知识载体需要且仅需要的。

（5）知识库系统之间是协作的。

为了实现这个理论框架，设计了一个称为PACT(Palo Alto Collabrative Test-bed)的系统。这个系统的功能是完成“重新设计机器人手臂”的任务，这个系统已在1991年10月进行了演示。

封闭巨型智能系统可以被考虑为公共知识载体上搭乘的一个起重要作用的知识库，这就是封闭类系统与半封闭类系统之间的继承关系。

5.5 半开放巨型智能系统方案

半开放巨型智能系统是另一类强调社会性的方案，它与半封闭系统方案研究的差别在于：在问题求解过程中，它不强调形成一个自成体系的独立系统；相反，它主张智能系统是由社会中各个独立的“个体”组成，只有对一个具体问题求解时，社会中的一部分（注意！这里强调的“一部分”，是与半封闭型系统的重要区别之一）“个体”才形成一个互相争论与协作的系统。因此在这个方案中，各个“个体”对一个实际问题的看法存在分歧（矛盾）是必然的，而解决矛盾是这个方案的关键所在，这也是它有别于封闭方案的要点之一。

5.5.1 矛盾

AI研究者很早就意识到在AI系统中知识的不完全及观测数据的不可靠是不可避免的，研究者试图利用带有统计意义的数学方法来解决这些问题，但在一致性的假设下，这些方法仅仅获得了有限的结果，具体地说仅对某些数据不可靠的情况有效，而对知识不完全的例外处理，则是无效的[①②]。在实际世界中的矛盾比传统逻辑意义下的矛盾要相对复杂：

（1）矛盾是具有相对性的。在不同的体系下矛盾会转换，例如XOR问题，其本质是在二维空间中定义的一组矛盾方程，即

---

① McCarthy. J. Circumscription: A Form of Non-Monotonic Reasoning, AI 1980, 13

② Nilsson. J. Principle of AI, Tioga Press, 1980

$$\begin{bmatrix}0&0\\1&0\\0&1\\1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_2\\x_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\1\\1\\0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\1&1&1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\1\\1\\0\end{bmatrix}$$

在右边方程的 4×4 矩阵中，第一列为阈值，第四列为第二列与第三列之积所产生的值。容易证明，上述 4×4 矩阵是满秩的，矛盾消除。

(2) 认知意义下的矛盾与逻辑意义下的矛盾是有区别的，逻辑意义下的矛盾就是存在互补对；而在认知意义下，则要复杂得多。例如 Shortliffe 曾提出下述两个逻辑公式在认知意义下是有区别的①：

$$A_1 \wedge A_2 \wedge A_3 \rightarrow B, A_1 \wedge A_2 \rightarrow B。$$

5.5.2　分布 AI 的分类

由于社会型系统与分布 AI 之间存在着密切的关系，下面将讨论分布 AI 的分类。分类的特征则取自对各子系统知识一致性与观测数据之间的组合。对分布 AI 可以分成以下四类：

(1) 知识一致，观测的数据相同：这种类型系统的主要任务是解决大搜索空间问题。它要求问题必须是可分解的，以便将一个在串行条件下无法解决的问题变成在多台机器上可解决。其难点在于对问题的分解及对资源的分配。

(2) 知识一致，观测的数据不同：这种类型的系统试图解决子系统所基于的知识是一致的，但它们所观测的数据却是不相同的问题，这类系统需要有综合各子系统推理结果的能力。

(3) 知识不一致，观测的数据相同：在整个系统中，每个“个体”的知识不一致，但其所面临的数据却是相同的，这就会引起争论，这个争论是由于每个“个体”对这组数据解释不相同而引起的（个体对世界的认识不相同）。医疗会诊是这类问题的最典型例子。

(4) 知识不一致，观测的数据有矛盾：这种情况主要发生在复杂的经济与军事决策中。

5.5.3　开放信息系统语义的理论框架②

1989 年 Hewitt 提出智能行为不仅仅表现在社会中的每个“个体”上，而且重要的是表现在这些“个体”的交流之中。为此他提出了开放信息系统语义的理论框架。它包括了七个基本概念：① 社会；② “自力”的个体；③ 承诺；④ 微理论；⑤ 依存与

---

① Shortliffe. H. Computer-Based Medical Consultation: Mycin, American Elsevier, 1976

② Hewitt. C. Open Information System Semantics for Dai, AI, 1991, 47

协作;⑥ 辩论;⑦ 交流。基于这些概念他提出了七个假设:

(1) “社会”是由“自力”的“个体”组成的。

(2) 每个“个体”具有解决问题及学习的能力。

(3) 每个“个体”对社会负有一定的责任,即对社会的承诺。

(4) 每个“个体”对世界有自己的认识,这种认识构成微理论。这种对世界的认识包括了对实际世界的认识及对自身世界的认识。后者意味着它可通过与其他“个体”的通讯改善自身。

(5) 每个“个体”对世界的认识有差异,这意味着他们所具有的微理论不一定是一致的。

(6) 每个“个体”承认对世界的认识有片面性及受资源限制,因此对世界中的任一个具体问题的求解,有听取别的“个体”意见的能力与其他“个体”协作的愿望。这就是“个体”之间的依存关系。

(7) 每个“个体”是自信的,但可在与其他“个体”的辩论中完善自己。这条与 6) 构成了交流。

如果将这个理论框架中的“个体”考虑为一些孤立的小系统,由这些小系统组成的社会考虑为智能系统,则上述理论框架就是这类半开放系统研究的基础。

半开放巨型智能系统方案可以考虑是对封闭类系统方案在系统体系“社会化”上的扩展,因此在封闭类系统研究中发展出的成果大多数可以被半开放巨型智能系统的研究所继承。

5.6 开放巨型智能系统方案

开放巨型智能系统方案的构思是考虑到人类思维过程的复杂性,从而站在系统理论的角度首先分析思维过程的复杂程度,由此得出思维过程是一类开放复杂巨系统的结论。开放型智能系统的研究者充分地认识到智能模拟的复杂性,他们从系统理论的角度分析了这类系统所应具有性质,从而在系统的分层结构、人机一体化及综合集成方法论等方面给出新的指导思想[①]。

5.6.1 分层结构

“一个智能系统应该是分层的[②]”,这个结论几乎已为所有 AI 研究者所承认。从专家系统研究开始,就认识到在一个系统中知识是应该分层的,由此将系统中的

① 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志,1990,13(1)

② Newell. A. The Knowledge Level, AI, 1982, 18

知识分成领域知识及控制知识。专家系统的研究经验表明，这类办法仅适合解决简单问题（简单系统）。

1984 年 Bobrow 对系统层次作了新的阐述①。他的观点是一个系统可以分成三个主要层次：功能、行为及结构。他以钟表为例，指示时间就是它的功能，指针跳动或数字变化就是它的行为，而机械构造或石英振荡机构就是它的结构。这种划分的特点是：① 功能可用不同的行为来体现，行为的实现可采用不同的结构；② 结构决定了行为，对行为的解释就是功能。这种分层的方法事实上已经是系统理论的思想。

1988 年钱学森在一次会议上提出了另一类分层的概念，他举了一个例子，“湍流的概念是用流体力学方程中的奇怪吸引子来描述的”。这个例子是完全不同的一种结构与行为关系的描述方式。流体力学方程对流体而言是一种结构的描述，而对其行为的描述则是方程在一定初始条件或边界条件下的解。结构是确定的，但其行为却不一定是确定的，它将取决于环境。这种分层的方式就不再是简单的、技术性的分层，而是更深刻的一种分层理解。

例如基于这种方式，可以把辩论行为解释成：① “意见一致”相当于有稳定的不动点吸引子；② “争论不休”相当于有一个极限环吸引子；③ “无法讨论”相当于奇怪吸引子。这个解释要比简单地提出一个力量较量的概念要深刻。对于学习过程同样可以给出新的解释，概念除了可以定义为稳定吸引子之外，还可以定义为极限环甚至奇怪吸引子（见湍流定义②）。这样学习就可以脱离线性的组合方法，从而大大开拓了学习研究的视野。

5.6.2　人机一体

AI 的研究一直未能摆脱制造机器生物的思想，这种以“自主”系统为目标的研究路线，严重地影响了 AI 研究的进展。Dreyfus 首先认识到这个问题③，在 1991 年钱学森与 CYC 的研究者分别提出了新的构成人与计算机亲密无间的智能系统的研究目标（见第 5.2 节），而国外对多媒体④⑤及灵境技术研究的大量投资也是对智能系统研究目标有所改变的明证。人机一体化将可实现形象思维的半机械化，就如同

---

① Bobrow. D. Qualitative Reasoning About Physical Systems: An Introduction, AI, 1984, 24

② Wang. J（王珏），and Tian. J（田捷）. Connectionist Problem Solving Based on Dynamics, PRICAI92, Seoul, Korea, 1992

③ Dreyfus. H. 计算机不能做什么（中译本）. 北京：生活・读书・新知三联书店，1986

④ Brand. S. The Media Lab, Inventing the Future at MIT, 1987

⑤ Maybury. M. Intelligent Multimedia Interface, AI Magazine, Summer, 1992

“情报的激活[①]”。这里必须强调，人机交互与人机一体有本质的差别，前者是人按机器的思路进行工作，人是被动的，这是传统 AI 的方法；后者则是人与机器是平等的，人与计算机互补，但人在创造性上却是主动的。

在人机一体的问题上有两个相辅相成的关键性的问题：其一是人机通讯，另一个是人机一体的体系。前者是实现开放巨型智能系统的必要条件；而人机一体的体系则涉及了更复杂的问题，它不仅仅与在半开放系统中由于引入社会性而带来的一切问题有关，而且面临人作为这个社会一员所带来的挑战。

5.6.3 综合集成研讨厅的理论框架

1991 年钱学森提出了从定性到定量综合集成研讨厅体系（简称研讨厅）的设想，简单地说，这个研讨厅是由人与计算机系统构成的一个解决复杂问题的社会团体。在这个团体中，人与人、计算机与计算机、人与计算机进行密切合作、各尽所能对它所面临的问题进行综合集成（metasynthsis）。这种综合集成的意义不同于目前流行的“集成（integration）”，它不是仅仅由简单地多种模块所组成，而是根据问题在某时刻的需要在系统理论意义下动态地构成社会团体的若干个子集，在不断地信息交流的过程中求得解（一般是局部解）。系统具有“进化”的特征，它可以不断成长、不断提高，其关键之点在于：① 每个瞬间系统所构成的小团体也许是不同的；② 系统构成是动态的。基于这种想法可以构成研讨厅的理论框架如下：

（1）研讨厅是由人与计算机系统组成的，人与计算机系统可以统称为成员。研讨厅的能力是所有成员综合集成的表现。

（2）成员对世界具有特有的看法及经验，成员之间对世界的认识可有共识并可存在矛盾。

（3）成员有向其他成员学习的愿望，并具有独立思考的能力。

（4）研讨厅存在着根据问题的需要构造互相协作小团体的能力。

（5）小团体中的成员根据问题求解的进程动态地变化。

（6）研讨厅是有具有层次的，这些层次有些是固定的，例如责任大小；有些则是动态的，例如辩论中理由申诉。

（7）研讨厅中的一些特殊成员（某些人）有对问题求解所得结论的最后解释权。

（8）研讨厅自身是开放的，其意义是对一个问题的求解过程，研讨厅自身是动态变化的，换句话说研讨厅应有详细的咨询索引。这个索引的使用过程也是动态的，它既可以来源于研讨厅已知的信息，也可以来自成员的即时推荐。

（9）研讨厅有能力接受实际环境变化的所有信息。

（10）研讨厅的通讯是畅通且方便的，这包括研讨厅与实际环境的通讯及研讨

---

① 钱学森. 科技情报工作的科学技术. 情报科学技术，特刊，1993

厅内成员之间的通讯，研讨厅问题求解过程是通过研讨厅成员之间及研讨厅与外界信息交换来完成的。

如果将这个理论框架中的研讨厅考虑为智能系统（称为超巨型智能系统），成员考虑为一些孤立的人或小系统，则上述理论框架就是这类开放系统研究的基础。

开放巨型智能系统方案可以考虑是对半开放巨型智能系统方案的一个扩展，尽管由此产生的问题是十分复杂的，但继承半开放巨型智能系统研究成果是必然的。

5.7　小结

对巨型智能系统的起因是对传统"孤立"专家系统研究的反思，无论对"AI 应用"的研究者还是对"思维本质"的研究者来说，"孤立"专家系统的能力均不能使他们感到满意。为此研究者提出了研究巨型智能系统的各种方案。本文根据系统设计策略及系统结构将这些方案分成四种类型，从而了解各类方案的特点与关系。

对封闭巨型智能系统的作表作 CYC 来说，其最主要的贡献是充分肯定了"知识就是力量"的定律。其贡献是：一方面 CYC 企图解决建立大知识库所存在的各种问题，另一方面在于这个大知识库所包含的内容是一般性知识（或称为常识知识）。CYC 计划的研究指出，AI 系统的脆弱性是与系统所包含的一般性知识不充分有关的，这点是深刻的。

半封闭巨型智能系统应说是一类过渡型的方案。过渡型的含意是指其最后形成的系统不是向开放型系统靠拢就是退回到封闭型系统上去。它对 AI 贡献应该说有两点：① 在系统建立的过程中使用了"社会"方式代替"自力"方式；② 更加强调综合集成的方法论。

无论从系统建造还是系统结构甚至 AI 所追求的目标来看，半开放巨型智能系统与传统 AI 均是不同的，"社会"方式在这个方案中得到充分体现：① 智能不仅是自力的个体行为的体现，更重要的是社会行为的体现；② 社会是有矛盾的，解决矛盾的过程是社会进步的原因，因此不应强调在社会中各个自力个体之间的一致性。基于这样的假设，智能系统应是分布的，是应有解决矛盾的能力的。这些问题的提出应说是对 AI 的贡献。

开放巨型智能系统是一类基于系统理论的方案，这个方案同样强调 AI 系统是社会型的，与其他三个方案相比这类方案有四个特点：① 社会中不仅包括计算机系统也包括人，由此导致了研究人在智能系统中的作用及人机通讯等问题；② 社会中的成员在实际问题求解中动态地组成层结构，同时这些层在一个求解进程中也是变化的；③ 在社会中成员的个性（包括表示、推理甚至系统组成）是多种多样的；④ 社会组成自身也是动态的。

在方法论中，这类系统的研究者是反对采用还原论方法的，他们强调综合集成

的方法，而这种综合集成与半封闭系统所采用的机械式集成的区别在于强调系统的动态组织。基于这样的想法，大量的研究课题被提出，它们大致可以分成两类：① 人机体系；② 系统理论的原理在 AI 中的应用以及社会系统工程的重要性与迫切性。这就是开放类系统的贡献。

开放类系统与封闭类系统之间的区别主要体现在系统结构是否是社会型的，其本质是对智能行为的认识是基于不同的假设：智能行为是个体的行为还是社会行为。开放类系统更强调后者，这样各个个体(成员)之间的交流就成为主要的研究课题。而在交流过程中产生矛盾及解决矛盾的方法就成为开放系统研究的要点之一。尽管这两类系统存在着本质的区别，但由于开放类系统的结构是基于个体(成员)的，而这些个体一般说在问题求解过程中是封闭的，因此在某种程度上，封闭系统所发展出的某些理论又是开放系统理论的一部分。

封闭型系统与半封闭型系统的区别主要是在系统建造的过程，半封闭系统采用了社会方式以克服建立大知识库中所存在的问题，但在智能模拟过程中，一些巨型的基于封闭思想的系统也许是不可缺少的，因为在思维过程中，一些对日常生活常识的描述不得不采用封闭的思想来完成，典型的例子是自然语言处理中语料库的建立，而问题在于这种封闭的思想不能直接推广到建立独立系统的目标上，Feigenbaum 已认识到这点，他在一篇文章中，明确地指出 CYC 与 PACT 的结合将是最理想的。

半开放型系统与开放型系统同样存在着重大的差别，在一个智能系统的社会中，对人的因素的考虑是最明显的区别，在开放型系统的社会中，人是非常得要的成员。对系统层次的认识也是不同的，半开放系统并不认为层次在其系统结构中有什么重要意义，原因是其层次基本是静止不动的；相反开放系统则十分重视层次的概念，其原因是在问题求解过程中，其层次是动态变化的，这就导致必须对层次概念进行深入研究。这两类系统同样存在着共同之点，即十分重视矛盾在系统中的意义(一方面矛盾导致学习，另一方面必须存在解决矛盾的方法)。

事实上，这四类系统之间并没有一个绝对的界限，例如，封闭型系统 CYC 的理论框架中包含了证伪的内容，这意味着在其系统中允许存在矛盾。而半封闭系统中的分布结构，也有社会的含意。本文只是根据这些方案理论框架的主体将其划分为四类。这四类巨型智能系统方案在理论、方法与技术上存在着继承关系，由此形成了一个系列。

相信未来的智能系统不会是一个“自力”的系统，这样的系统绝不会通过像日本第五代计算机计划那样的智能计算机来实现；相反，它一定是社会型的，它的实现依赖于一组人与一群计算机的通力合作，追求纯粹的计算机智能是没有意义的。

6 形象(直感)思维与人机结合的模式识别[①]

6.1 引言

20 世纪 80 年代初,钱学森提出创建思维科学技术部门的主张,并认为思维科学研究的突破口在于形象思维[②]。1986 年国家高技术计划把“智能计算机系统”作为信息领域的主题之一。由于对智能计算机的研讨,越来越多的人对研究形象(直感)思维的重要性有了更进一步的认识。

谈到形象思维往往使人联想到科学中的启发性论据(heuristics),就人工智能领域来说,专家系统取得了很大的进展,而启发式知识的应用及启发式搜索是专家系统不同于一般计算程序的关键之一。启发式知识是一些难以精确描述的知识,它以专家的经验为基础,以及一些直观感觉,是一种感性认识,还不是理性认识。所以我们可以对启发式知识作这样的理解:有关目前问题局况与合适的解之间的经验认识,这种经验知识难以用语言讲清楚,但又非常重要。

关于如何从整体上来看待一个系统的整体性能,把握全系统的形象,而不是系统中的一枝一节。格式塔(Gestalt)心理学的观点是值得借鉴的,格式塔的一个基本特征,凡是格式塔,虽然它是由各种成分与要素构成的,但该格式塔绝不等于构成它的所有成分之和。一个格式塔是一个超出于这些成分的全新整体,它是从原有的构成成分中“实现”出来的,因而它的特征与性质都是在原来的构成成分中找不到,概而言之,部分不能决定整体;“整体”的性质反过来却对“部分”的性质有着极重要的影响。必须重视整体的形象。

我们还可以从中国古代治学思想中得到启示。例如,中医里的“证”即从人体的整体状态考虑进行综合诊治,而不是头疼医头,脚疼医脚,也是讲从整体上考虑问题。另外人从眼、耳、鼻、舌等感官,获得信息,进行模式识别,把感官感觉到的信息和知识与大脑中存储的医理模式从整体上加以比较,进行搜索和匹配找出并识别“形象”。而这种搜索和匹配的效率与情感密切相关。从以上这些方面加以引申来探讨形象(直感)思维可以说抓住了问题的实质。

---

① 戴汝为. 形象(直感)思维与人机结合的模式识别. 模式识别与人工智能,1994,23(2)

② 钱学森主编. 关于思维科学. 上海人民出版社,1986

6.2 比喻的方法

在讨论到与形象(直感)思维有关的问题时,认为一些经验的体会是"只可意会、不可言传"。有人就问,既然不可言传,那么怎么能理解,又如何加以研究呢? 这是中国传统文化着重于"用心体会"的认知方式,存在着不容易进行交流的弱点,但绝不是无法研究。中国历史上佛教到了六祖慧能继承衣钵创立了南宗顿教,规定的教义之一是"不立文字"。讲求的是创造的直观,亦即在感受中领悟某种宇宙的规律。慧能本人是不识字但能"悟"的典范,而佛教也一直流传下来。《易传·系辞》上曾有一段很深刻的文字"书不尽言,言不尽意;……圣人立象以尽意"。前人对只可意会的东西的论述,采用的是比喻的方法。比较典型的一个例子,是范缜对形神关系的比喻,就非常精彩,在中学教科书中可找到。形神的比喻是:"神之于质犹利之于刃,形之于用,犹刃之于利,利之名非刃也,刃之名非利也;然而舍利无刃,未闻刃没而利存,岂容形亡而神在(《神灭论》)"?

前人还采用"比类取象","援物比类"等方法。这里我们用中医诊断疾病来对形象(直感)思维作比喻,也许可以对形象(直感)思维有进一步了解与较好的说明。从中医诊断来加以分析,首先是立"象[①]",大夫通过多种媒体(望、闻、问、切)等感知及自身的体会,建立子模式,再形成与各种病症对应的模式类。立"象"的过程是大夫与大量的病人接触,学习与诊断的过程,病人实际上起到为大夫提供样本的作用。立"象"是十分复杂的认知过程,是大夫的实践与经验积累的过程。可以说是多维(望、闻、问、切)的自下而上的综合集成(metasynthesis)过程。这是由大夫的大脑这一系统来完成的。最终把实践经验沉积于大夫的脑中,形成表征与各种病症相对应的各种模式类的"意",达到立象表意,如图 6-1 所示:

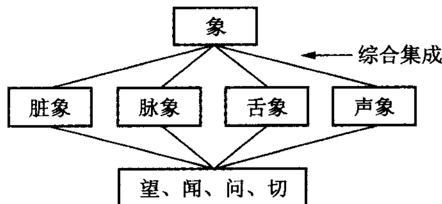


图 6-1 中医的立象示意图

"立象"很重要,在此过程中,采用以象说象的办法建立一种描绘整体形象的比较抽象的象称为"意"。中医大夫对病人疾病的诊断是靠对人体的整体了解以"意"之间的相似性来加以判断。以象说象的办法可以用一个二元式来表示一个模式 P 的方

① 王前,刘庚祥.从中医取象看中国传统抽象思维.哲学研究,1993.4

式加以表达，P 包括象（用 I 表示）与意（用 E 表示）两个成分：

$$P = P(I,E)。$$

其中，I：称为模式 P 的象，包括感性成分与理性成分。

E：称为模式 P 的意，是一种比 I 较为抽象的象也包括感性成分与理性成分。

E 的感性成分是相应的象 I 的感性成分的凝练和浓缩。

E 的理性成分是相应的象 I 的理性成分的涵盖和总结。

由于中国传统思维中认为感性与理性是相通的。所以 E 可认为是从 I 通过综合集成，即从定性到定量的综合集成所得的结果，如图 6-2 所示：

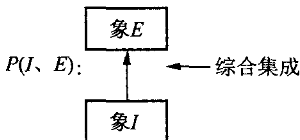


图 6-2　从象到意的示意图

从象到意可以是一个层次，也可以用多层次形象的类比与寓意来完成。

总之，人进行模式识别的过程可以说是形象（直感）思维的主要内容之一，而综合集成在识别的过程中起着核心的作用。关于模式识别，德国的涅曼有如下说法：对于简单的模式，识别指的是分类；对于复杂的模式，识别指的是描述。可以说包括分类与描述两重含义。归结起来人的模式识别有两个要点，即认知（cognition）与识别（recognition），英文的 recognition 这个字表达得较为清楚。说得更详细一点，人的模式识别是：

（1）以实践与经验为基础，通过多种媒体的认知（cognition）经反复学习，包括有教师的学习，在人脑中建立模式类，即“建模”或立”象”，并通过综合集成而从总的方面掌握“意”存储于脑中。

（2）对新出现的模式，用一种衡量“意”之间的相似性度量进行搜索识别（recognition）。判定与存储在脑中的哪一类模式相匹配，这就需要对存储在脑中的所有模式进行搜索。而在搜索过程中不是一个一个的顺序搜索，搜索和匹配是两个重要的环节，与人的情感有关，那种突如其来的发现，例如，突然领悟了“呀！原来是这么回事”的体验，是需要借助于情感的。当人们颇为激动的时候，他们从象到意的综合集成及搜索和匹配的效率就会提高，总之从中国传统思维中把形象（直感）思维概括为“象、意、情”的综合体现，应该说是很有道理的。

6.3　模式识别的语义句法方法

上节我们讨论了人的模式识别。用计算机进行模式识别所形成的软硬件技术已成为信息技术中一个组成部分。虽然也有一些人从认知的角度来研究模式识别，

但到目前为止，用计算机进行模式识别的工作中，所面对的都是十分死板的模式。对于"建模"这一重要问题几乎完全忽略，把问题转为"对样本的特征抽取"。而特征抽取并没有一般的行之有效的方法。在利用计算机进行处理的前提条件下，6.2节所谈到关于一个模式包含两部分的构思得到充分发挥。一个模式也可定义为：$P=P(x,u)$。其中，x 表示 P 的结构信息，称为句法部分。u 表示 P 的属性等，称为语义部分。

并考虑一个模式P由一些称为基元(primitive)的基本元素构成，这些基元具有某些能刻画基元性质的属性，属性可以用数值表示，基元之间的相互联系用关系属性表示，由若干基元可以构成子模式，再由若干子模式构成更复杂的模式，以此类推最终构成所研究的模式。如果一个子模式由若干基元组成，而基元的属性已经知道，那么子模式的属性如何由基元的属性加以决定的办法称为语义规则或语义函数。于是就形成一个形式化的体系，可以采用一种称为"语义句法方法"的方法来描述这一体系。这种描述也包括两个部分，一是句法部分，用一个上下文无关文法或有限状态文法的导出式表示；二是语义部分，它包括基元、子模式的属性，基元与子模式间的关系属性，以及语义函数，如表6-1所列。

表6-1　语义句法的两个方面

句法部分	语义部分
树状描述	基元属性、关系属性、语义函数

在用计算机进行模式识别的发展过程中，最初采用的一般性的数学方法是统计法或决策理论法，以后又提出一种以形式语言理论为基础的句法方法。这里所谈到的语义句法方法①，早在1981年就提出来了，这一方法实质上是把统计方法与句法方法有效地综合在一起了②。

6.4　人-机结合的模式识别

在以往用计算机进行模式识别研究的过程中，有一点人们注意得不够，即识别模式有两种学习方法，称为有教师的学习(supervised learning)与无教师的学习(unsupervised learning)两种，前者在学习中有人参与，后者无人参与。其实用人机结合的办法来进行模式识别才是明智的，关键之处让人指点一下，大量繁琐的工作由计算机去完成，采用有教师的学习意味着人的参与是十分值得提倡的事。这一点我们

① 戴汝为. 从定性到定量的综合集成技术. 模式识别与人工智能，1991，4(1)

② Dai，Ruwei(戴汝为)，Fu，Jingsun(傅京孙). Semantic Syntax-Directed Rranslation for Pictorial Pattern Recognition，Purdue Univ Tech Rep，1981，TR EE

还要从另一角度加以说明。在6.2节中，我们讨论人的模式识别时，从“象”到“意”是人脑加以综合集成而达到的，用计算机根本没法做到。局限于语义句法的描述而言，实际上在对语义的处理方面，如何计算语义函数也是个问题，换句话说如果一个子模式 $P(x,u)$ 由 k 个模式 $P_1 \cdots P_k$ 个更小的子模式构成的属性记为 u，P_i 的属性为 $u_i, i=1,2,\cdots,k$。说得简单一点所谓的语义函数，就是如何由 $u_1,u_2,\cdots,u_i$ 而得到 u。如果一个模式由一个树状结构表示，那么问题就是如何从树的叶节点的属性逐层往上综合以求得与根节点相对应的属性。语义函数是一个非线性的映射，这种非线性的映射计算起来比较困难。根据近年来人工神经网络研究的进展，有人论证了在满足一定条件的情况下，一个多层人工神经网络可以实现一个非线性映射。根据这个理论结果，我们就可以用人工神经网络来作为语义函数，如图6-3所示：

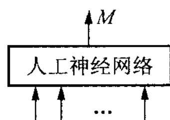


图6-3　语义函致的构建

而这种人工神经网络的参数即“权”值是通过有教师的学习来完成的，由教师把握住宏观的情况。所以人在这一过程中起到积极的作用。这样一来确定语义函数就有了一定的办法。我们把模式有语义句法描述及采用人工神经网络的识别方法称为“基于人工神经网络的语义句法模式识别方法①”。从这一方法中还得到一点看法，对某些不太复杂的问题，可以用人工神经网络来实现综合集成。上述确定语义函数的方法已在手写汉字识别中有所体现②，教师起了大作用。另外，再加上下述子结构检测器的设计。依靠这两点形成了人机结合的汉字识别方法。识别手写汉字所遇到的困难是由于各人书写汉字时的方式与习惯不同，所以是千变万化的，计算机难以判断对于输入机器的一个汉字，有的笔画究竟是一个短划呢？还是由于噪声形成的“毛刺”。另外由于连笔等问题把笔画当成基本元素不实际。所以把字根（偏旁部首）作为基本单元，称为子结构。通过一些运算把子结构检测出来，与子结构对应的运算是靠人确定的。一个子结构由若干笔画组成，检测到的子结构由畸变的笔画构成，具有模糊性，把这些模糊了的笔画的属性 $u_1,u_2,\cdots,u_k$ 送到一个类似于感知器(perceptron)的网络中，然后根据一系列的样本来进行学习，并经过一定的非线性处理。求得与子结构对应的属性（用一个向量表示）如图6-4所示：

---

① Dai, Ruwei（戴汝为）. A Connectionist Syntactic Semantic Approach for Pictorial Pattern Recognition, Proc, Infoscience'93, Seoul, Korea(Invited Paper), 1993

② 刘迎健，戴汝为，张立清. 基于神经网络的手写汉字特征选择. 模式识别与人工智能，1992，5(1)

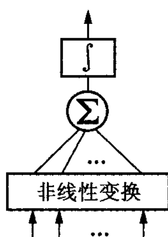


图 6-4　求与子结构对应的属性

例如对于字根“木”，把左偏旁为“木”的字作为正样本，把左偏旁不是“木”的字作为负样本，把大量正、负样本输入计算机，教师的作用是把握宏观状况。当一个样本输入时确定网络的输出应该是“正”或“负”，用一个算法对参数加以调整，并给出一定的准则以确定在 n 个参数中，有较大影响的 $P_1, P_2, \cdots, P_m$ m 个，则这个量可以定义为子结构的属性。该训练过的网络就起到语义函数的作用。

以上介绍的是十分具体的识别问题，从中看出对于不太复杂的问题，我们从工程技术的角度，可以采用人工神经网络及有教师的学习方法，或人机结合方法来实现综合集成(metasyn thesis)。它告诉我们形象思维的重要性，也启发我们在研究更复杂的巨系统问题时，该如何去开拓前进的道路。

7 思维系统工程[①]

科学决策涉及众多学科，参与决策的多方面专家作为群体，决策过程就是人的思维运用及其创新。因而思维科学及思维系统工程的研究，就可为科学决策和咨询提供理论基础和支持技术[②]。

7.1 思维科学与思维系统工程

7.1.1 思维学与思维的分类

思维与智能是人类智慧探索过程中密不可分的两个部分。阐明思维与智能的原理是自然科学与社会科学交叉的重大课题，具有深远的意义。研究人的智能、动物的智能以及机器智能的学问在国外称为认知科学(cognitive science)。认知科学是认知心理、人工智能、脑科学、神经生理学、计算机科学、科学语言学和哲学等众多学科交叉的新兴领域。对于人的智能研究而言，思维可以说是核心问题所在。

20 世纪 80 年代，钱学森积极倡导开展思维科学的研究，先后发表了数篇重要论文和讲话[③~⑥]，思维科学的研究在国内蓬勃开展起来。钱学森强调马克思主义哲学对这门学科的指导作用，为了区别于认知科学，采用思维学这一名称，并将 noetic science 作为思维科学的英文译名。思维科学可以划分为思维科学的基础科学——思维学；思维科学的技术科学及思维科学的工程技术——思维系统工程。

思维有三种基本类型：逻辑思维，微观法；形象思维，宏观法；创造思维，微观与宏观相结合。人的创造需要把形象思维的结果再加以逻辑论证，是两种思维的辩证统一，是更高层次思维，所以名为创造思维。创造思维才是智慧的源泉，逻辑思维和

---

① 戴汝为. 支持科学决策和咨询的技术——思维系统工程. 中国工程科学，2005，7(1)

② 戴汝为. 钱学森论大成智慧工程. 中国工程科学，2001，3(12)

③ 钱学森. 自然辩证法、思维科学和人的潜力. 哲学研究，1980，4

④ 钱学森. 系统科学、思维科学与人体科学. 自然杂志，1981，1

⑤ 钱学森主编. 关于思维科学. 上海人民出版社，1986

⑥ 钱学森. 开展思维科学的研究. 自然杂志，1983，8

形象思维都是手段①。

多年来,对逻辑思维方面的研究比较多:自 20 世纪 70 年代,复杂性、整体性、人与自然协调等重大问题不断出现,对形象思维、创造性思维的研究逐渐成为研究的热点。它们在认识事物、科学发展和技术发明中的作用,越来越受到国际、国内学者们的重视。中国学者从传统的整体观念和现实实践中总结出的"社会思维",在我国的学术研究和实现咨询决策的科学化中正在发挥着日益重要的作用。

7.1.2 思维的系统观

系统科学在国内的发展与取得的成就众所周知。系统科学由三个层次组成:工程应用层次,具有代表性的是各种系统工程②;技术科学层次,其代表作是在国际上誉为经典著作的工程控制论;基础理论层次,是我国学者提出的开放的复杂巨系统及其方法论——综合集成法③。

钱学森进一步提出思维的系统观④:从思维的类型看,要解决一个课题,即使是比较简单的课题,单靠一种思维系统如抽象思维是不够的,至少要用形象思维与抽象思维的配合。所以解决一个课题的思维是更高层次的二阶思维系统;从思维的过程看,要能解决一个课题必须依靠各种知识和信息,而且要从思维过程的进展不断提供知识和信息,所以用系统科学的术语来表达,上述系统属于开放系统的范畴。

至于咨询和决策的工作,要解决的,要做出回答的已经不是单一的课题而是课题群,是互相有关联的课题群。参加工作的也不是一个人、两个人,而是一个专家群体,有数十上百甚至更多的人。这样集体思维,也就是说社会思维显得极其重要了。

这种思维过程必然非常复杂,其规律比思维大系统还要大,用系统科学的术语来说,就是开放的思维巨系统。建立和启动这样一个开放的思维巨系统,将是一项崭新的工程技术——思维系统工程。

7.2 社会思维与群体智慧

社会思维是指人作为社会整体对客观现实的认识,它是在整个社会时间、社会

① 钱学森.钱学森致戴汝为信件,思维科学研究.中国人民大学出版社,1999

② 钱学森,许国志,王寿云.组织管理的技术——系统工程,论系统工程.湖南科学技术出版社,1988

③ 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论.自然杂志,1990,13(1)

④ 戴汝为.钱学森对系统科学、思维科学的重大贡献,宋健,钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集.中国科学技术出版社,2001

关系的基础上，无数个人思维和各种群体思维交互作用、多元复合的观念体系[1]。社会思维是人作为社会主体的整体思维，从思维主体范围的角度来看，社会思维包括个人思维和群体思维。群体思维是以若干思维个体组成的群体作为思维主体形成系统的特有功能，从而产生单个个体所不能达到的整体思维能力[2]。也可以说，群体思维就是在个体思维差异之合理配合的基础上，充分发挥各自优势，通过思维互补形成总体思维功能的思维方式。它能够综合个别主体之长，弥补个别主体之短，它既能形成一种个别主体所没有的新的认识能力，又能使群体中诸个体的认识能力得以扩大。如此反复促进，就形成了整体智慧，它给我们带来了新的扩大了的认识能力。

社会思维学认为，人的思维是集体的，人作为整体来进行思维，思维的主体不是个体而是集体；集体讨论是社会思维的主要形式，集体成员之间的相互对话、讨论、反驳、自省等都是激发群体及个体智慧的有效手段；民主集中制是社会思维的规律，在研讨中能互相启发、互相激励，从而使集体远胜过一个个单独个体和不接触别人的简单综合。集体的智慧成果所形成的讨论结果或者决议体现了人进行集体思维的过程，成为集体思维的实现和群体智慧涌现的有效形式。

社会思维学的研究要遵循毛泽东的《实践论》解决面临的决策咨询等实际问题。就是要把有关专家群体、计算机系统及信息技术，以及互联网形成一个综合集成研讨厅，实施以人为主，人机结合，从定性到定量的探讨；充分发挥专家群体，集体讨论的整体优势，把专家的猜测、形象思维所得出的“泛化”等定性认识通过大量的信息与知识加以论证，上升到理论认识，并不断的进行新一轮的处理，由新的定性认识再上升为理论，这就是采用思维系统工程的办法来解决复杂的决策咨询问题。

7.3　综合集成研讨厅——一项思维系统工程

综合集成研讨厅的构思及理论框架是钱学森于 1992 年提出来的[3]。在其后的 3 年中，作者结合当时人工智能领域中国际上在进行研制的一些著名的智能巨系统，就“封闭与开放”及研制过程、问题求解过程两方面加以分析，同时把这些系统的理论框架进行比较。从智能科学的角度，进行了具体研究，提出综合集成研讨厅属

---

① 曾杰. 社会思维与新技术革命. 思维科学，1985，3

② 张育民. 关于社会思维学的几个重要范畴及其三大规律. 晋阳学刊 4，1995

③ 王寿云，于景元，戴汝为，汪成为，钱学敏，涂元季. 开放的复杂巨系统. 浙江科学技术出版社，1996

于开放的巨型智能范畴，并对其框架结构做了具体阐述[①②]。

7.3.1 研讨厅的理论框架[③④]

综合集成研讨厅由三个部分组成：专家体系、知识/信息体系和机器体系。其中：

（1）由参与研讨的专家组成的专家体系，是研讨厅的主体，是决策咨询求解任务的主要承担者，专家体系所发挥的“性智”，往往是问题求解的关键。

（2）由专家所使用的计算机软硬件以及研讨厅提供各种服务的服务器所组成的机器体系，它具有高性能的计算能力、数据运算和逻辑运算能力，为定量分析发挥重要作用。

（3）由各种形式的信息和知识组成知识/信息体系，包括与决策咨询相关领域的知识、信息，问题求解的知识、信息。

运用综合集成法，把这三个部分连接为一个整体，形成统一的、人-机结合的巨型智能系统。这类智能系统构成的综合集成研讨厅是基于网络的智慧集成平台，同时也是基于社会思维的群体智慧涌现的平台，成为科学决策和咨询的工作平台。

7.3.2 研讨厅的技术构建[⑤⑥]

针对研讨厅实现过程中所要解决的主要问题：专家体系建设、不良思维模式的预防、纠正有效交互方式；机器体系建设中系统框架设计，功能模块和软件模块的分析综合，软件系统开发方法；知识/信息体系建设中定性知识和非结构化知识的表达与抽取，知识共享，信息获取和问题推荐等。以智能工程为核心的现代技术，解决了上述问题，完成了研讨厅的技术构建。

（1）综合集成研讨厅模型。采用类似语意句法模式识别的有向属性图描述，建立专家研讨过程中的模型，为扩展研讨厅系统和定量分析及研讨过程可视化提供了工具。

（2）基于 WWW 广义专家与协作推荐技术，使研讨厅的讨论成果不仅是若干个人类专家智慧的集结，还体现了数以百万计网民群体的智慧。

---

① 戴汝为，王珏．关于巨型智能系统的探讨．自动化学报，1993，19(6)

② 戴汝为，王珏，田捷．智能系统的综合集成．浙江科学技术出版社，1995

③ 操龙兵，戴汝为．基于 Internet 的综合集成研讨厅体系结构研究．计算机科学，2002，29(6)

④ 操龙兵，戴汝为．综合集成研讨厅软件体系结构．软件学报，2002，13(8)

⑤ 操龙兵，戴汝为．面向 Agent 的开放巨型智能系统的处理机制．模式识别与人工智能，2002，15(3)

⑥ Cao，Longbing(操龙兵)，Dai，Ruwe(戴汝为)．Human-Computer Cooperated Information System Based on Multi-Agents，ACTA Automatica Sinica，2003，29(1)

（3）以交互管理理论制定研讨组织方法，针对群体思维的散发性及复杂问题求解过程，分别提出各研讨阶段的组织方法。

（4）群体智慧涌现及可视化，开发了描述群体智慧涌现过程的算法和可视化软件模块。

（5）从机器智能到人机结合的“群体智慧”。以人工智能的问题求解技术，面向Agent的系统开发方法进行综合集成。

（6）可视化的模型集成工具，实现“所见即所得”。

7.3.3　Internet的综合集成研讨厅实例[①]

通过5年多的研究，开发出3个研讨厅的版本。最后采用一个代码同时运行于服务器客户端的混合体系结构。客户端代码主要以Java小程序的形式，实现操作界面、响应时间等客户端的特殊功能；服务器端包括sametime服务器和模型服务、资源服务以及数据库服务、用户管理等功能。

这种研讨厅系统具有信息技术综合利用的特点和较强的可操作性。表现在：

（1）人机结合以人为主。系统以人为中心提供各种不同的应用手段，让使用者更加回归到现实社会人和人的交流中，形成“人机分工、各取所长、以人为主、人机一体”的人机智能系统。该系统采用无线网络技术和多种输入方式，研究终端可自由移动，使专家之间“自如探讨”。

（2）面向网络。采用最新通讯方式，提供基于Web协同工作平台。面向Internet，世界上任何地点的专家，都可以通过Internet实现实时的文本、数据、语音、视频交流。只要授权，在任何地点、任何时间有研讨需要的一切企业、机关、单位等，都可参与实时交流，沟通和问题探讨。

（3）资源共享。系统中可共享文档、数据、图表等显性知识；通过研讨厅共享存在于人的大脑里的隐性知识。

（4）实时跨平台协作。研讨厅的成功之路从Windows延伸到Mac、Sunos和Linux，并将继续向更多平台前进。实时协作、同步研讨，做到“研讨厅无处不在”，改善了Internet在全体会议、决策和资源共享等方面的缺陷。

（5）多媒体接口设计。可使用即时语音交流、手写汉字识别、指纹识别、视频会议等多媒体手段，方便研讨，激化思维，引导深入。

（6）严格安全管理。基于IBM的sametime安全服务，整合专家注册、登陆管理、指纹识别、保证通过信息空间（cyberspace）所进行的研讨能安全进行。

（7）结合知识管理。体现知识生产与服务，实现“民主集中”工作空间，通过专

---

① 李耀东，崔霞，戴汝为. 综合集成研讨厅的理论框架设计与实现. 复杂系统与复杂性科学，2004，1（1）

家体系、知识体系与机器体系所构成的系统发挥综合优势来实现对设定问题的研讨过程。

这种以 Internet 为载体的分布式综合集成研讨厅，实现了人机结合与综合集成方法的具体化，运用现代信息技术使其具有可操作性，所以具有支持科学决策与咨询的实用前景。针对不同领域和不同决策需要，更换专家群体，改变设定目标，进行软件修改，即可实际应用。现在一种用于支持经济宏观决策的综合集成研讨厅版本已经推出，正在逐步推广。我们将更加努力，为尽快完善综合集成研讨厅体系做出应有的贡献！

8 从现代科学技术体系看今后智能系统的工作[①]

8.1 引言

在有关系统的研究中，人们越来越清楚地认识到，系统的复杂程度一方面取决于系统本身，另一方面取决于系统的运行环境。一个简单的受控的对象在复杂的环境中运行，实际上复杂的程度就大为增加。以往人们往往从表征系统特点的“控制”与“信息”两个方面把系统划分成控制系统与信息系统两种类型。从这两种类型的系统的发展来考察系统的发展过程，可以概括为从简单系统到复杂系统进而到开放的复杂巨系统。简单系统发展阶段的标志是控制论；复杂系统（包括自主的智能系统）发展阶段的标志是人工智能，这类系统体现了把专家的经验、知识注入到系统中；开放的复杂巨系统（包括智能型开放系统）的研究尚处于开始阶段，这阶段的标志是人机结合的大成智慧。这类系统体现了把专家群体的经验、知识等注入到系统中。从简单系统向复杂系统的发展，系统由数学描述转为计算机程序的描述；从复杂系统向开放的复杂巨系统的发展，根本的问题是方法论的改变。为讨论的方便，我们把自主的智能系统与智能型开放系统均称为智能系统。

8.2 现代科学技术体系简介

如何看待科学技术体系以及科学技术体系究竟包括哪些部门是十分重要的问题。现代科学技术体系的建立是钱学森用马克思主义哲学作指导，总结出来的，是毛主席《实践论》的结果。早在他由美国刚回到祖国的 1955 年，发表了归国后的第一篇文章，题为“论技术科学”。文章阐述了科学领域中三个层次的观点，即基础理论、技术科学、应用技术三个层次。并以自己亲身参与美国应用力学发展的深刻体会，论述了技术科学的重大意义与作用：在任何一个时代，今天也好，明天也好，一千年以后也好，科学理论决不能把自然界完全包进去，总有一些东西漏下了，是不属于当时的科学理论体系里的，总有些东西是不能从科学理论推演出来的。所以虽然自

① 戴汝为. 从现代科学技术体系看今后智能系统的工作，系统科学：祝贺钱学森同志 85 寿辰论文集. 浙江教育出版社，1996

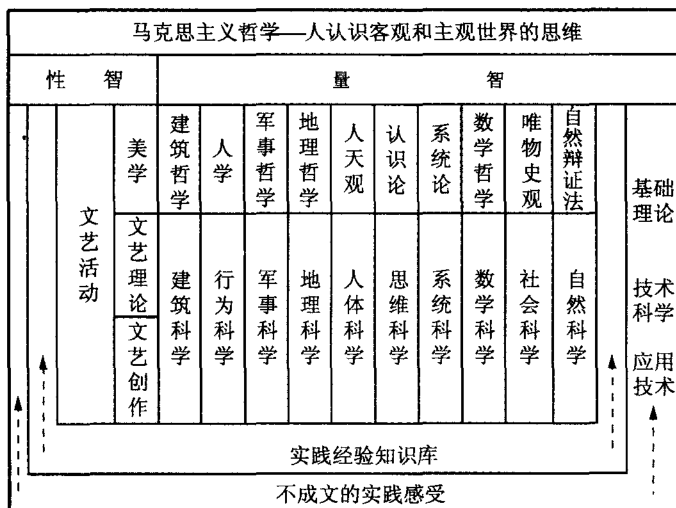
然科学是工程技术的基础,但它又不能完全包括工程技术。因此有科学基础的工程理论就不是自然科学的本身,也不是工程技术的本身,它是介乎自然科学与工程技术之间的,它也是两个不同部门的人们生活经验的总和,有组织的总和,是化合物,不是混合物。要综合自然科学和工程技术,要产生有科学依据的理论,需要另一种专业的人。由此看来,为了不断地改进生产方法,我们需要自然科学、技术科学和工程技术三个部门同时并进,在任何一个时代,这三个部门的分工是必需的。钱学森在国内,又经过 20 多年从事尖端技术的实践与经验积累,于 20 世纪 80 年代首次在中央党校讲课时把原来人们心目中的自然科学和社会科学两大部门,扩展到 8 个,加上数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、军事科学和文艺理论,形成一个体系。过了几年又加上地理科学、行为科学。今年 6 月又提出建筑科学的设想,在这过程中曾与建筑专家及城市规划专家谈过。总之,现代科学技术体系是基于各门科学研究的对象都是统一的物质世界的认识,区分只是研究的角度不同,这就从根本上拆除了以往各门学科之间仿佛永远不可逾越的中界,也必然使辩证唯物主义与各门科学内在地、紧密地熔铸在一起。这个体系从纵向分为三大层①:最高层是马克思主义哲学。马克思主义哲学、辩证唯物主义是人类一切知识的最高概括;从智慧形成的高度,以"性智"与"量智"来概括各科技部门及文艺活动与美学对人类的性智与量智两种类型智慧的形成与影响;最下面一层是现代科学技术十一大部门,即自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、地理科学、军事科学、行为科学、建筑科学以及文艺理论与文艺创作。并分别通过 11 座"桥梁":自然辩证法、唯物史观、数学哲学、系统论、认识论、人天观、地理哲学、军事哲学、人学、建筑哲学以及美学,把马克思主义哲学与十一大科技部门联在一起。在每一大部门中,又分成基础理论、技术科学及应用技术三个层次。在十一大部门之外,还有未形成科学体系的实践经验的知识库,以及广泛的、大量成文或不成文的实际感受,如局部的经验、专家的判断、行家的手艺等等也都是人类对世界认识的珍宝,不可忽视,亦应逐步纳入体系。总之,这一分类法显示出这十一大部门之间本来就是互相联系、互相促进、不可分割的关系,并揭示了马克思主义哲学与各门具体科学技术必然的、紧密的熔铸在一起的内在关系,形成统一完整的现代科学技术体系。以上所述的现代科学技术体系是钱学森近些年来心血与智慧的结晶,体现出集大成的智慧。

这个体系可以用表 8-1 加以表示:

---

① 钱学森.科学的艺术与艺术的科学.北京人民文学出版社,1994

表 8-1　现代科学技术体系



马克思主义哲学——人认识客观和主观世界的思维												
性智		量智										
文艺活动	美学	建筑哲学	人学	军事哲学	地理哲学	人天观	认识论	系统论	数学哲学	唯物史观	自然辩证法	基础理论
	文艺理论	建筑科学	行为科学	军事科学	地理科学	人体科学	思维科学	系统科学	数学科学	社会科学	自然科学	技术科学
	文艺创作											应用技术
实践经验知识库												
不成文的实践感受												

8.3　复杂系统的建模及理论基础

对系统的研究是从简单到复杂的。从控制系统的角度来看，在现实的生产活动中，所遇到的控制问题往往很复杂，有的包含着多种物理与化学的过程，有的控制对象具有不确定性而且会发生突变。在国民经济和国防建设中，具有全局性影响的系统往往朝着大型化与复杂化的方向发展。关于什么是复杂系统，有不同的说法。我们认为，具有复杂行为的系统，其复杂性表现在系统的部件之间，或子系统之间有着很强的耦合作用，具有难以线性化的非线性性质，所以会出现极限环甚至混沌现象。同时系统具有高度的不确定性，要求具有实时性等。从另一个角度，即人工智能的发展来看，研制专家系统的知识工程师们的实践，在于把人工智能中的原理和工具，用到需要专家知识解决的那些应用问题上。获取知识、表达知识，并适当地应用知识来构造和说明推理路线等问题，是知识库系统设计中的重要问题。构造智能媒介这种技术是程序设计技术的一部分，也是它的扩充。用大量的知识来表达和推理是复杂的信息处理问题。所以专家系统这种自主的智能系统也属于复杂系统。它立足于编制复杂的计算机程序来实现各种应用领域中的专家系统。国内外学者已认识到，把人工智能的原理与方法及人的经验与智慧用于复杂系统的控制是一条有效的途径，并且开展了许多有意义的工作。

下面我们着重讨论从简单系统往复杂系统的过渡与发展中，所遇到的问题。由于系统复杂程度及凌乱的性质增加，所以除了其应用局限于简单的情况而外，通常不得不采用计算机建模与模拟，而不是像以往研究简单系统那样采用数学描述和数

学模型,并借助于定理(theorems)来描述简单系统的行为。当前,甚至于在物理中某些较为理论的部分,问题的求解也很少用封闭的符号形式,通常是通过很多个小时的计算,用数值方法解决,可以说物理学家是世界上超级计算机的最大用户。我们把简单系统的建模与复杂系统的建模分别表示如下:

数学建模(数学模型)⇔简单系统的描述

计算机建模(程序表达的模型)⇔复杂系统的描述

实际上,在面对复杂系统时,复杂系统的主要理论与简单系统的主要理论也大不相同。前面我们谈到,自主的智能系统属于复杂系统的范畴。它的理论属于人工智能(AI)的理论。人工智能的先驱 H. A. Simon 总结了 AI 的主要理论有两种形式,两种形式初看起来大不相同:一是以计算机程序形式表示的精确理论;二是 H. A. Simon 与 A. Newell 称之为“定性结构定律(Laws of Qualitative Structure)”的较模糊(fuzzier)的理论。

在物理学,控制系统的研制中,微分方程系统作为表示系统精确理论的主要工具,为了对微分方程解的预测,微分方程系统必须补充上对系统的参数、初始和边界条件的经验性的估计。简单的微分方程系统能够以闭合形式求解,从而产生系统行为的一般定理,对参数的任何值均成立。但是当情况稍微复杂了一些之后,要想获得封闭形式的解就不可能了,只能在参数取特定值时进行模拟求解,于是又转向于刻画复杂系统的定性概括的途径。

在解释计算机程序作为一种形式的理论时,必须小心的是确定程序的什么特性表示理论,哪些特性被认为是并无关联的“记号”,对于相应理论的特定的应用,程序的哪些部分构成边界条件和初始条件等等。

用计算机程序来表示一种理论,这是信息技术发展的必然趋势,是比较容易理解的。而对于以定性结构表示的比较模糊的定律,也是以经验为基础的科学发展的必然结果。下面我们把 40 多年来人工智能研究中,由 Simon 等所概括的若干定性结构定律作简要地介绍[①]。

8.3.1 物理符号系统假设(PSSH,Physical Symbol System Hypothesis)

这个假设认为:任何一个系统,如果它能表现出智能,它必定能执行下述 6 种功能。反之,任何系统,如果具有所说的 6 种功能,它就能表现出智能。所说的 6 种功能如下:

(1) 输入符号(input):纸、笔加上手的运动,可以给纸输入符号。

(2) 输出符号(output):当人们阅读时,文字符号从纸上进入眼睛。

① Simon,H. A. Artificial Intelligence: An Empirical Sciences,Artificial Intelligence,1995,77

(3) 存储符号(store):能把符号存下来。

(4) 复制符号(copy):能认出所存储的符号,并存储于某个地方。

(5) 建立符号结构(build symbols structure):通过找寻符号之间的关系,在符号系统中形成符号结构。

(6) 条件性转移(conditional transfer):依赖已掌握的符号而继续完成行为。

物理符号系统假设可以说是传统人工智能中的基石之一。

8.3.2　启发式搜索假设(HSH,Heuristic Search Hypothesis)

这一假设认为:一个要求具有一定智能加以解决的问题,要通过在一个问题空间(即一个问题的表达),用有选择的(Heuristically)搜索加以解决。这一假设否定问题的一般解决是在巨大的许多问题空间中通过详尽无遗的搜索,或者不用问题空间的结构的知识的帮助,这些结构知识是用以转化为控制搜索的启发式论据。

这一假设也是传统人工智能中的基石之一。上述两个假设是 H. A. Simon 和 A. Newell 在获得图灵奖的演说中特别谈到的。

8.3.3　识别型的问题求解

在经过 20 多年有关专家系统的研究工作,认为“识别(recognition)”型的问题求解(REC)也是一条定性结构定律。专家系统大量解决的是经常发生的识别过程的问题,也即识别起着中心的作用。

8.3.4　知识原理(KP,Knowledge Principle)

一个系统以高水平的能力表现出具有智能的理解与作用,主要由于特有的知识,使它能运用所致力于的领域中的概念、事实、表达、方法、模型、比喻和启发式的论据。

8.3.5　从事例中学习(LE,Learning from Examples)

如果提供一个产生式系统(production system)若干问题的解的事例,并显示求解的中间步骤,然后,以手段-目的(Means-end)分析或者有关的因果属性法,就可以用来自动产生能够求解相类似问题的新产生式。

8.3.6　关于自然语言翻译,也总结了一条定性结构定律

确切的自然语言的翻译,不仅要求词汇和语法的知识,而且需要语义知识的实在的体系,从而提供解决歧义性的语境。

国外通过多年来对人工智能的研究,概括出以上 6 条定性结构定律。从数学理论的角度来看,以上的定律是太不严格了,但客观世界本身就不是严格的,往往是模

糊的。生命现象、社会现象、人的感知与经验等，难以用数学定理加以描述，只好采用定性结构定律来描述。

8.4 方法论的讨论

前面谈到从简单系统到复杂系统的发展，对系统的研究从采用数学为工具转为采用计算机程序为工具。至于用什么方法的问题并不突出。但是，当系统从复杂系统上升到更加复杂的开放的复杂巨系统时，以往所习惯采用的还原论的方法就难以满足需要了。方法论的问题成为突出的问题。80 世纪 80 年代末，为处理开放的复杂巨系统问题，钱学森等提出了“从定性到定量综合集成法[①]”。这一方法以《实践论》为立足点，强调人的主导作用及经验的重要性，主张人与计算机结合。这个方法的最初表达为：处理开放的复杂巨系统的措施是“将专家群体（各方面有关的专家）、数据和各种信息与计算机技术有机地结合起来，把各种学科的科学理论结合起来，这三者本身也构成一个系统。这个方法的成功应用就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势”。综合集成法的提出是方法论上的一个飞跃。我国有“集大成”的说法，就是说，把一类非常复杂的事物的各方面综合起来，集其大成。采用综合集成法(metasynthesis)就可以把人的思维、知识、智慧及各种情报、资料、信息统统集成起来，通过信息网络共享人类的知识与智慧的结晶，解决经济建设、科技发展中遇到的十分复杂的问题，形成一门以综合集成法为核心的工程，称为大成智慧工程(metasynthetic engineering)。

以上是从系统科学发展的角度来看的。由于人脑这个系统是一个开放的复杂巨系统，人的智能行为源于这个系统。我们从智能系统的工作来看，与其紧密相关的人工智能正面临着要解决两个根本性的问题：一是扩展(scaling up)问题[②]，即以往的人工智能所用的符号表示、启发式编程及逻辑推理的方法，只适于研制专家系统这类较为狭窄的智能系统，不能推广到规模更大、领域更为宽广的复杂系统，如智能型开放系统中去；另一个是所谓的交互(interaction)问题。人们已经深有感触，传统的人工智能方法只能模拟人的逻辑思维支配的行为，而不包括人与环境的交互行为，因此根据模拟人的逻辑思维所研究成功的系统不具备与环境进行交互的能力。这两个问题表明人工智能要有进一步的发展，必须突破以逻辑为基础，以启发式编程为特征的方法的局限性，建立新的理论基础，提供新的方法。

---

① 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论，论地理科学. 浙江教育出版社，1994

② 戴汝为，王珏，田捷. 智能系统的综合集成. 浙江科学技术出版社，1995

前面所说的综合集成，也可以用于智能系统的研制①。综合集成是人与计算机两者相结合，计算机发挥自己速度快及擅长于逻辑运算等特点，而人发挥自己的感知、形象思维能力。总之，计算机能完成的工作就让计算机去做，这当然需要把这部分问题加以形式化，才能由计算机完成。至于关键的、无法形式化的部分则由人加以解决。用综合集成法处理复杂问题的步骤，可归纳如下：

(1) 明确任务、目的是什么？

(2) 尽可能多地请有关专家提意见和建议。专家的意见是一种定性的认识，肯定不完全一样。此外，还要收集大量的有关文献资料，认真地了解情况。

(3) 在通过上述两个步骤，有了定性的认识，在此基础上由知识工程师参与，建立一个系统模型。建立模型的过程中必须注意与实际调查数据结合起来，统计数据有多少就需要多少个参数。然后用计算机进行建模的工作。模型建立后，通过计算机运行得出结果。但结果的可靠性如何？需要把专家请来，对结果反复进行检验、修改，直到专家认为满意时，这个模型才算完成。

(4) 在知识工程师的协助下，提出问题求解的约束条件与期望目标，选择合适的求解方法，根据求解结果判断是否达到期望的目标。如果没有达到，生成新的问题求解状态，继续进行，不断循环地进行求解，直到满意为止。在计算机工作时，可以根据中间结果与所获得的信息不断给计算机增加新的知识，修改期望的目标，也可以终止计算机的运行，重新设定问题求解的初始状态。

以上步骤综合了许多专家的意见和大量书本资料的内容，不是某一个专家的意见，而是专家群体的意见，是定性的、不全面的感性认识加以综合集成，达到对于总的方面的定量认识，所以说是一种集大成的智慧，在一定程度上体现了把专家群体的经验、知识注入到系统中。

上述具体步骤表明：从定性到定量综合集成这一处理开放的复杂巨系统的方法是可操作的，用以处理十分复杂的问题时，能够得到对整体的定量的把握。

8.5 今后智能系统工作的展望

在智能系统的研制与发展过程中，曾受到来自各方面，特别是哲学界的批评，但这个领域内部人士提出具有巨大影响的见解是在 20 世纪 90 年代初。1991 年在悉尼举行的第 12 届国际人工智能联合大会上，MIT 的年轻教授 R. Brooks 针对传统的人工智能研究中的核心问题“表示(representation)”与“推理(reasoning)”，提出具有挑战性的“没有表示”、“没有推理”的智能的看法。他以自己研制的具有某种适应能力的“人造昆虫”这种类型的自适应系统作为论据(这不禁使人回想起在控制论兴

---

① 戴汝为，王珏，田捷. 智能系统的综合集成. 浙江科学技术出版社，1995

盛时期人们研制过类似的装置),给从事人工智能的人们以启示:必须考虑能在环境中有效运行的智能系统,环境的复杂性体现了系统的复杂性。Brooks 的工作代表了人工智能的新方向,称为"现场(situated)AI"。现场 AI 强调智能系统与环境的交互,为了实现这种交互,智能系统一方面要从所运行的环境中获取信息(感知),一方面要通过自己的动作(作用),对环境施加影响。现场 AI 的提出,一方面使人感到自动控制领域中的一些论点与方法是值得借鉴的,更重要的方面是扩展了对人类思维的研究和模拟的范围。国际上已普遍开始重视除逻辑思维以外其他思维形式的研究,这在 1995 年蒙特利尔的第 14 届国际人工智能联合大会上明显地表现出来。在这届大会上,Simon 荣获大会授予优秀研究奖后发表了演说,题为"不可言传的解释——AI 中的直感(intuition)、顿悟(insight)和灵感(inspiration)"话题,专门谈了谈这些与智能密切有关的"只可意会、不可言传"的现象及其模拟问题[①]。据他的看法,目前计算机程序已经有可能对这三者进行模拟。读了 Simon 的报告,我国科技界的人士会感到兴奋与高兴,事实表明了中国一些杰出的科学家对某些重大科技问题的洞察与把握、构思的超前性、对科技前沿的某些方面的敏锐眼光往往高于国际同行。这可以从我国在 20 世纪 70 年代末就提出开展思维科学研究的主张这件事体现出来。前面曾提到过,钱学森在 20 世纪 80 年代提出的科学技术体系中,已经把思维科学纳入这个体系。他同时提出建立思维科学技术体系的主张,并认为思维科学研究的突破口在于形象思维[②]。前面所述的直感与形象思维相类似,而灵感与顿悟都与形象思维有着密切的联系。形象思维的特点往往是"只可意会、不可言传",用计算机模拟与处理困难很大。他在 1980 年"关于形象思维问题的一封信(《中国社会科学》1980 年第 6 期)"中谈到:我们要把逻辑学扩大为思维学,包括一部分我们已经研究得很多而且很有成绩的逻辑思维,还要包括其他的人的思维过程。这在外国已逐步地引起重视,他们是从搞机器人、人工智能这方面考虑的,搞人工智能、机器人,就要搞一个人工智能、机器人的理论。这个理论,他们叫认知科学(cognitive sciences)。我们用"思维科学(几年后,英文定名为 noetic sciences)"更确切一点,就是包括逻辑思维,也包括其他的各种思维过程,如形象思维等等。这些学术观点的重要性和超前性,经过了 10 多年,到了 1995 年才为广大的科技人员所接受与理解。总之对于 AI 的研究来说,现场 AI 的诞生,加上对三个 I(Intuition,Insight,Inspiration)的研究,改变了传统 AI 的面貌,进入了非传统 AI 的新局面。

如果我们来分析和估计 AI(或智能系统)今后的工作,必然会有各种各样的看法,有待进一步讨论。这里谈谈钱学森在读了清华大学张钹的"近 10 年人工智能的

---

① Simon,H. A. Explaining Ineffable-AI on Intuition,Insight and Inspiration Topics,Proc,of IJCAI-95

② 钱学森主编. 关于思维科学. 上海人民出版社,1986

进展”一文之后，于 1995 年 10 月 23 日给本文作者及钱学敏的信中，谈到的如下看法：

“人工智能”从按设计者的思想设计出一个机器去按规定执行这一工作开始，现在是要机器能像人那样在变化多端的环境中完成某一方面的工作。这是很大的扩展！对这一大变化，国外人工智能专业工作者似乎没有认识到：① 机器要认识工作对象；② 机器要认识工作环境；③ 机器认识了工作对象和工作环境这种千变万化的情况后，要能作出正确的判断，选出方案去执行；④ 在执行中也会发现原来方案不足或有误，要修正。换句话说，机器要能像人那样感觉和思考！这是说人工智能是一项系统工程，要用多种学科，只有所谓“人工智能”是远远不够的，要用控制论（讲反馈外部情况），用系统科学，还有思维科学。

其实说到底，是要机器干人做的事。人工智能还需要了解人，即人体科学知识。至于部件设计要用自然科学知识，认识工作环境需要社会科学知识等等，也不能忽略。这不是涉及整个现代科学技术体系了吗？所以未来的人工智能工作是人机结合的一项“大成智慧”工程！

我们一旦进入这样的人工智能世界，人类也跟着被改造了，将会出现一个“新人类”，不只是人，是人机结合的“新人类”！

以上看法，从现代科学技术体系的高度来看待 AI 的工作，使我们的视野大为开阔，对今后智能系统的发展，必将起到积极的推动作用。

8.6　小结

以微电子、计算机、网络和通信为核心的信息技术的发展，导致一场信息革命，也就是我们所面临的第五次产业革命[①]。正在全球兴起的信息网络建设，可以说是这场革命的先声。目前国内已有众多的网络与 Internet 联网，计算机信息网络的重要意义已为大家所认识。但信息网络的建设是分散的，没有统一的规划。如果认真地加以考虑，那么我们就应该：

（1）用前面所说的现代科学技术体系来建立信息网络，使得人类已掌握的与即将掌握的知识与技术能以极其灵活方便的方式为人类所共享，从而创造出更大的物质财富与精神财富。

（2）有了这样的信息网络，人们用这一信息网络，达到运用自如，真正成为人机结合的“新人类”。

① 戴汝为，于景元，钱学敏，汪成为，涂元季，王寿云. 我们正面临第五次产业革命. 光明日报，1994-02-23

9 钱学森对系统科学、思维科学的重大贡献[①]

20 世纪 40 年代第一台快速电子数字计算机诞生。计算机的问世，为信息技术与信息科学的发展奠定了基础，同时促进了一些新领域的开拓，如控制论、人工智能等。起初人们对计算机可能起到的伟大作用缺乏认识，经过一个阶段，到了 20 世纪 70 年代，计算机已渗入到各行各业。对于现代化的社会来说，几乎所有的地方都可以发挥计算机的作用，从而离不开计算机。与此同时，用计算机模拟智能的人工智能研究在一些方面取得了可喜的成绩，知识工程的形成就是一个例子。用机器代替部分脑力劳动的工作已经举目在望，这造成一些人工智能的专家对近期可能取得的成就，做了过分乐观的估计。这导致有的人急于求成，忽视有关智能问题的基本理论，有人甚至主张不要理论。一方面人工智能成为国际上的一大热门，但同时学术思想处于混乱状态。日本于 70 年代实施了一项模式信息处理系统计划后，又在 80 年代初进行一项第五代计算机计划，发展知识信息处理技术。世界各国也纷纷采取行动，制订各种计划，致力于研制新型的、便于进行知识处理和模拟智能的计算机技术和人工智能技术。在这样的背景下，钱学森站在科技发展的前沿，提出创建思维科学(noetic sciences)技术部门，并指明人工智能、智能计算机的发展道路。把 20 世纪 30 年代中国哲学家曾经主张，并有所争论，但当时条件下没法讲清楚的"思维科学"这一概念，赋予了现代科学含义概括成为具有三个层次的思维科学这一研究领域。

9.1 对思维科学发展的主要贡献

(1) 钱学森对现代科学技术体系进行合理的划分，于 20 世纪 80 年代初，提出创建思维科学技术部门。在发表的"系统科学、思维科学与人体科学(1981)"，"关于思维科学(1983)"，"开展思维科学的研究(1984)"等文章中，首次对思维科学进行了科学的论述。认为思维科学是处理意识与大脑、精神与物质、主观与客观的科学，是现代科学技术的一个大部门，与自然科学、社会科学是平起平坐的。推动思维科学研究的是计算机技术革命的需要。钱学森把思维科学划分为思维科学的基础，思维科

① 戴汝为. 钱学森创建我国现代思维科学及建立研究基地的回顾. 中国科学院自动化研究所技术报告，1991

学的技术科学及思维科学的工程技术三个层次。思维科学的基础科学是研究人有意识思维规律的学问，称为思维学。思维学又可细分为三个部分：① 抽象（逻辑）思维学：抽象思维是可以用计算机来代替人脑工作的那部分思维。② 形象（直感）思维学：形象思维建立在经验或直感的基础，主要研究人类根据经验或直感产生智能的行为，以及如何用计算机机实现这一过程，并使之上升为理论。③ 灵感（顿悟）思维学：灵感思维是形象思维的扩展，由直感的显意识扩展到灵感的潜意识。此外，还谈到社会思维学，社会思维学研究人、集体的思维以及如何利用人类过去积累的知识，思维活动实际上具有集体性质。人类认识客观世界不但靠实践，而且要利用过去人类创造出来的精神财富。另外信息对认识过程有非常重要的意义，研究信息和信息过程的信息学也是思维科学的基础科学之一。在技术科学这一层次，包括结构语言学和数理语言学，模式识别，情报学和科学方法论等。科学技术工作绝不能局限于抽象思维的归纳推理，即所谓的科学方法，而必须兼用形象或直感思维，甚至于要得助于灵感或顿悟思维。思维科学中直接改造客观世界的学问属于工程技术层次，如人工智能、计算机软件工程、密码技术、情报资料库技术、文字学和计算机模拟技术，以及其他。钱学森还针对有的权威人士把认知心理学与思维学相混淆，作了澄清：认知心理学就是上升到精神学（mentalics）也还是人体科学基础学科层次，属人体科学大部门。而思维学属思维科学大部门。不能把两者混在一起。研究意识、研究人的思维，一条路是研究脑，是脑科学的道路。这条路非常长，一时、两时不会有结果，还得走思维科学的道路，依靠思维科学内部的一些方法来研究。正如物质结构，当然可以深入到基本粒子，深入到亚基本粒子、夸克，但多少年来化学家们研究分子结构，并没有等待这些深层结构的阐明；化学还是化学，不必越过学科划分，进入物理学、进入基本粒子物理学。

（2）钱学森提出思维科学的研究将孕育着一场新的科学革命。另一方面，思维科学的研究又会推动智能计算机的发展，把人的知识、智力提高到前所未有的高度，这肯定又将是一场技术革命。他主张发展思维科学要同人工智能、智能计算机的工作结合起来，批评了那种搞人工智能、智能机不要理论的说法。他以自己亲身参与应用力学发展的深刻体会，指明研究人工智能、智能计算机应以应用力学的研究为借鉴，走理论联系实际，实际要理论指导的道路。应用力学在 20 世纪 30 年代迅速发展起来，由于航空的需要促进了应用力学的发展，而有了应用力学的指导，航空事业发展得更快了，到了 50、60 年代就进入空间了，产生了火箭、导弹。这说明技术没有理论的指导是不行的，而理论的发展又要靠工程技术提出要求，提供素材。发展信息技术的情况也是如此。人工智能的理论基础就是思维科学中的基础科学思维学。研究思维学的途径之一是从计算机技术、人工智能、智能机的实践中加以提高上升为理论；另一途径是从哲学的成果中去寻找，思维学实际上是从哲学中演化出来的。他还认为形象思维学的建立是当前思维科学研究的突破口，这也是人工智

能、智能计算机的核心问题。

(3) 钱学森把系统科学方法应用到思维科学的研究中，提出思维的系统观，即以逻辑单元思维过程为微观基础，逐步构筑单一思维类型的一阶思维系统，即构筑抽象思维、形象(直感)思维、社会思维以及特异思维(灵感思维)等；解决课题的二阶思维开放大系统；然后是决策咨询高阶思维开放巨系统。并从社会思维和开发复杂巨系统的高度，论述了社会系统，把研究人这个复杂巨系统看作是社会系统的微观研究。在社会系统的宏观研究方面，根据马克思创立的社会形态概念，即任何一个社会都有三种社会形态——经济的社会形态，政治的社会形态和意识的社会形态，把社会系统划分为社会经济系统、社会政治系统和社会意识系统三个组成部分。相应于三种社会形态应用三种文明建设，即物质文明建设(经济形态)、政治文明建设(政治形态)和精神文明建设(意识形态)。社会主义文明建设应是这三种文明建设的协调发展。从实践角度来看，保证这三种文明建设协调发展的就是社会系统工程。从改革和开放的现实来看，不仅需要经济系统工程，更需要社会系统工程。

9.2 建立思维科学的重要活动

(1) 1984 年 8 月国防科工委在北京召开了两个重要会议："第五代计算机讨论会"与"全国思维科学讨论会"。在前一个会议上明确了所谓第五代计算机有两种含义：① 第二代巨型机(比一般的大机器还要大)；② 第一代智能机(因为智能机以前还没有)。在后一个会议上，钱学森作了长篇讲话，对"开展思维科学的研究"作了全面系统的阐述。会后全国思维科学学会筹备组成立。

(2) 1985 年 9 月 26 日，在河北省涿县召开"全国第五代计算机学术研讨会"，在开幕式上钱学森发表了题为"我国智能机的发展战略问题"的讲话，明确指出：人工智能、智能机的理论是思维科学，而思维科学的发展也恰恰要靠智能机、人工智能的工作。也可以说用思维科学来指导智能机的工作，又用智能机的发展来推动思维科学的研究。这也是具有中国特色的、理论与实践结合的人工智能的发展道路。并批评了国际上有的人工智能专家认为人工智能研究中不需要理论的说法。

(3) 1986 年 7 月，《 关于思维科学 》一书由上海人民出版社出版，10 月全国思维科学学会筹备组在京举行筹备组会议，讨论思维科学的突破口问题。

(4) 1987 年 2 月、1987 年 5 月在北京大学举行了两次北京地区思维科学讨论会。1987 年 7 月国家高技术智能机系统专家组成立，在清华甲所举行第一次会议。12 月 25 日钱学森应邀对专家组全体成员作报告，在"智能机技术是当今我国的尖端技术"的报告中指出"智能机是我们国家现阶段的尖端技术，犹如战略核武器是我们国家 20 世纪 50 年代至 70 年代的尖端技术一样 …… 对于智能机，可以说方向、途径都不清楚。并认为要考虑十一个方面的工作：① 人工智能，包括模式识别，专家

系统等，我们要从中吸取营养。② 脑科学，也有人叫模拟神经系统，智能机的研究也要从脑科学和模拟神经系统方面吸取营养。③ 认知心理学，这方面的专家提出 connectionism，也是强调网络的作用。④ 哲学，哲学是哲人之学，自古就是讲智能、讲创造的，搞智能机的人为什么不研究一下哲学。⑤ 与形象思维有关，是文学、诗词的语言。文学家、诗人说的不是讲道理的。他说青山、绿水，意思不一定是指青山、绿水，他可能指另外的东西。对于这样的语言，我们应该研究。⑥ 研究科学家关于科学方法论的言论。科学家的创造，有许多并不是来源于逻辑推理。科学家的创造思维中有智能的作用。⑦ 社会思维学，我们在讨论问题时，常常互相启发，互相启发是个什么道理？⑧ 模糊数学，创造性思维一开始都不是清晰的，而是由模糊到清晰。⑨ 并行运算的重要性，因为人的神经网络就是并行的，不仅高度并行，而且是极度并行的。⑩ 古老的数理逻辑，这个领域也有许多新的发展，这方面的工作也不能忽略。⑪ 系统理论，系统学。现设想的智能机是一个很复杂的思维系统。从系统学的观点来看，这样一个系统要避免出现混沌现象，一出现混沌就乱套了，那就不是智能机了。

(5) 1988 年 6 月 28 日，在国防科工委系统所举行“智能机理论讨论会”会上，人机结合的观点阐述得较充分。

(6) 1989 年 4 月，国家高技术智能计算机主题项目发展计划纲要(草案)经反复修改后问世。

(7) 1990 年初钱学森从社会经济系统、人体系统和地理系统的研究与实践中提炼出开放的复杂巨系统及其方法论以及从定性到定量的综合集成技术。从定性到定量的综合集成技术是思维科学的应用技术。

(8) 1991 年 5 月，在钱学森的建议下，智能计算机系统专家组在北京航空学院举行，研讨深入开展形象思维的问题。并将在北京举行全人工智能与智能机学术会议。

以上一系列活动，说明钱学森结合国际学科发展，针对我国建设需要，走具有中国特色的思维科学研究道路，为我们树立了典范。

9.3 提出思维科学研究的突破口

思维科学研究的突破口在哪里？这是一个对思维科学的发展有着十分重要意义的问题。早在 1980 年在“关于形象思维的一封信”中，钱学森就提出要研究形象思维的规律。在 1984 年全国首届思维科学讨论会上，他又明确地提到：“我建议把形象思维作为思维科学的突破口。因为它一旦搞清楚之后，就把前科学的那一部分、别人很难学到的那些科学以前的知识，即精神财富，都可以挖掘出来，这将把我们的智能开发大大地向前推进一步。还谈到：形象(直感)思维是我们思维科学现在

要突破的，而且由于智能机的研制工作已经提到日程上来，对突破形象思维也是一个压力。多少年来，这个问题一直是隐隐约约的。中国古话讲，只能意会，不能言传，能言传的都是讲得清楚的问题，而形象(直感)思维现在没法讲清楚。如果将来我们说能讲清楚了，哪怕只讲清楚了一点儿，也不是小事，我想那将是人类历史上的又一次科学革命”。虽然形象思维研究的重要性已经十分清楚了，但由于问题的难度大，以及其他种种原因，进展并不明显。1986 年 7 月 5 日钱学森在给戴汝为的信中又强调了形象思维，他写到：“您说到思维科学的研究，我仍然认为其突破口在于形象思维学的建立，而这也是人工智能、智能机的核心问题。因此，这也是高技术或尖端科学的一个重点，我们一定要抓住它不放，以此带动整个思维科学的研究。至于如何带动，请筹备组同志讨论，一定要有个安排，叫大家为此中心工作”。全国思维科学学会筹备组于同年 10 月讨论了思维科学突破口问题，筹备组的许多成员赞同上述见解。光明日报于 10 月 27 日以记者杜明明的名义，发表了戴汝为写的一篇报道，标题为“思维科学研究的突破口在哪里”，副标题为“钱学森认为在于形象思维学的建立”。这篇报道其实是把钱学森关于形象思维的观点与主张作了一个概括与介绍以期引起更多人的关注，主要的内容概括如下：

我国思维科学研究的突破口在哪里？这是不久前全国思维科学学会筹备组在京成员会议上议论的主题。科学家钱学森认为，突破口在于形象思维的建立。他说：“这是人工智能、智能机的核心问题，因此也是高技术或尖端科学技术的一个重点，一定要抓住它不放，以此带动整个思维科学的研究。”

20 世纪 80 年代初，钱学森就曾提出创建思维科学部门的建议。他认为，思维科学是一门处理意识与大脑、精神与物质、主观与客观的马克思主义哲学。从纵向可划分为思维科学的基础、思维科学的技术科学及思维科学的工程技术三个层次。由于思维科学是一门综合性的交叉学科，故需要多种学科的配合研究。可以心理学、人工智能、计算机科学、数学、生理学及文学艺术等方面着手来研究人的思维过程的规律。思维科学的应用领域十分广泛，涉及科学语言学、模式识别、人工智能、教育学、情报学、管理学、文字学等学科的研究。短短几年来，思维科学在我国作为一门新兴的学科已引起各方面专家、学者的兴趣与关注。目前全国有不少地方开展了与思维科学研究有关的活动。

为了明确思维科学研究当前的主攻方向及必须采取的相应措施，钱学森发表了上述看法。筹备组的许多成员赞同他的见解。大家认为，正当我国把制订与实施有关智能机、智能机器人、现代自动化综合系统等高技术计划提到日程上来的时候，促进与实现脑力劳动自动化密切相关的思维科学的发展有重大的现实意义和长远的科学意义。当前，思维科学的研究应该围绕着新一代计算机-智能机的基本问题，并致力于建立人工智能的理论基础，使我国人工智能的研究与发展具有自己的特色。我们应把思维科学研究的突破口放在形象(直感)思维的研究上(例如，如何有效地

利用人的经验为依据的直感思维与启发式知识，由经验加学习获得新知识等），为在我国研究和发展智能机及各式各样高水平的智能系统作出自己的贡献。这是一项高度综合的艰巨任务，需要有各方面的专门人才，才有可能胜利完成。

近几年来，从不同的角度开展了思维的研究，有了一些关于形象思维的研究成果。浙江大学潘云鹤于1991年初完成题为"形象思维中的形象信息模型的研究"文章。这项工作得到了钱学森的肯定与鼓励。其他如"形象思维中的形象信息模型"一文的引论及参考文献中，客观地介绍与列出了我国近年来有关形象思维的研究结果。杨春鼎的专著"文艺思维学"；肖君和的专著论思维—思维探新；李传龙的专著"形象思维研究"。钱学森、刘再复的"文艺学、美学与现代科学"、尹红风、戴汝为的"论思维及模拟智能"等是具有一定参考价值的工作。不及详述，也可能还有一些好的工作漏掉。

钱学森最近谈到："如开讨论会，我建议要保密。不要一下子都漏出去，让外国人得利。遵照这个建议，我们只涉及一些已有国内公开发展的文章与资料及通信中的很少部分。注意以韬光养晦的精神来对待我国思维科学的研究。"

9.4　从定性到定量的综合集成技术

"从定性到定量的综合集成法"，其实质是把各方面有关专家的知识及才能、各种类型的信息及数据与计算机的软、硬件三者有机地结合起来，构成一个系统。这个方法的成功之处就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势，为综合使用信息提供了有效的手段。按我国传统的说法，把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来，达到对整体的认识，称之为"集大成"。实际上，"从定性到定量的综合集成技术"，就是要把各种情报、资料、信息，把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧统统集成起来，因此可以称为"大成智慧工程(Metasynthetic Engineering)"。

钱学森在提出"从定性到定量的综合集成法"的过程前后有一个明确的观点，即：面对开放的复杂巨系统，这类问题应采取的对策是"人-机结合"、以人为主的综合集成，需要把人的"心智"与计算机的高性能两者结合起来。他总结了在思维科学与智能机有关问题的讨论过程中所得出的看法："我们要研究的不是没有人实时参与的智能计算机，是'人-机结合'的智能计算机体系"！他借鉴我国哲学家熊十力把人的心智(human mind)概括为"性智"与"量智"两部分，对"人-机"结合作了解释。我们可以这样理解："性智"是一种从定性的、宏观的角度，对总的方面巧妙加以把握的智慧，与经验的积累、形象思维有密切的联系。人们通过文学艺术活动，不成文的实践感受得以形成；"量智"是一种定量的、微观的分析、概括与推理的智慧，与严格的训练、逻辑思维有密切的联系。人们通过科学技术领域的实践与训练得以形成。"人-机结合"是以"人"为主，"机"不是代替"人"，而是协助"人"。从信息处理的角度

来考虑把人的“性智”与“量智”与计算机的“高性能”信息处理相结合，达到定性的(不精确的)与定量的(精确的)处理互相补充。目前人们清楚地认识到计算机能够对信息进行精确的处理，而且速度之快是惊人的，但它的不足之处是定性的(不精确)处理信息的能力却很差。尽管研究者将一系列近于定性处理信息的方法引入计算机系统中，企图完善其处理能力，但对于真正复杂的问题，计算机则还是难以解决。与此相反，与计算机相比较，人处理精确信息能力是既慢又差，但是定性处理信息的能力是十分高明的。因此在解决复杂问题的过程中，能够形式化的工作尽量让计算机去完成，一些关键的、无法形式化的工作，则靠人的直接参与，或间接的作用，这样构成“人-机结合”的系统。这种系统既体现了“心智”的关键作用，也体现了计算机的特长。这样一来人们不仅能处理极为复杂的问题，而且通过“从定性到定量的综合集成”，达到“集智慧之大成”。

1992年，在“从定性到定量的综合集成法”的基础上，钱学森针对如何完成思维科学的任务——“提高人的思维能力”这个问题，汇总了几十年来世界学术讨论的seminar，C^3/I工作及作战模拟、人工智能、灵境技术(virtual reality)、人机结合的智能系统，及系统学等方面的经验，进一步提出我们的目标是建成一个“‘人-机结合’，以人为主、从定性到定量的综合集成研讨厅体系”，简称“从定性到定量的综合集成研讨厅(hall for workshop of metasynthetic engineering)”。这是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的“厅”。这是把专家们和知识库信息系统、各种人工智能系统、每秒钟几十亿次的计算机等像作战指挥厅那样组织起来，成为巨型的“人-机结合”智能系统。“组织”二字代表了逻辑、理性，而专家们和各种“人工智能专家”系统代表了以实践经验为基础的非逻辑、非理性智能。所以这个“厅”是21世纪的民主集中制的“工作厅”，是辩证思维的体现。

从定性到定量的综合集成技术，是用于处理开放复杂巨系统的方法论。钱学森认为是思维科学的一项应用技术。就其实质而言是将专家群体(各种有关的专家)、数据和各种信息与计算机技术有机结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来。从思维科学的层次划分来看，智能计算机、人工智能、种种实用的智能技术系统、软件工程、文字学等都属于这一实用层次，综合集成技术也属于这一层次，至于模式识别、知识系统、数学语言学、结构语言学、情报学、科学方法论等属于思维科学的中间层次。思维学包括我们目前关心的形象思维学是思维科学的基础层次，基础理论的建立往往需要大量实用层次和应用层次的工作，在实践中加以总结和提高。关于智能机的研究，已经进行了几年，以往有关于智能系统的工作几乎都局限于低层次，十分局限的情况，从开放的复杂巨系统的高度研究智能系统，更需要综合集成技术，这方面的研究将会使思维科学有一个大的推进。

9.5　强调马克思主义哲学对研究系统科学和思维科学的指导

我们开讨论会，进行研究，想通过自己的工作为形象思维学的建立贡献自己的一份力量。而面对的是前人未做过的，十分艰巨的工作。钱学森经常提醒我们要以马克思主义哲学作为指导，与外国人相比可以看出这是我们的优势所在，这是前辈科学家，一生战斗在科学前沿，为我国科学技术发展拼搏所得的深刻体会，是我们在为发展思维科学而努力的过程中把握住方向的保证。在这里引用钱学森 1989 年 8 月 28 日“基础科学研究应该接受马克思主义哲学的指导”一文中最后的一段话作为互勉：“马克思主义是智慧的泉源，所以基础科学研究应该接受马克思主义哲学的指导；基础研究也是一条向前不断流去的长河，是有方向的，不是不可知的。我们应该常常想着毛泽东的一句话：‘马克思主义并没有结束真理，而是在实践中不断地开辟认识真理的道路。’”

中　篇

开放的复杂巨系统及综合集成研讨厅体系

10 开放的复杂巨系统及其方法论[①]

开放的复杂巨系统存在于自然界、人自身以及人类社会，只不过以前人们没有能从这样的观点去认识并研究这类问题。

10.1 系统的分类

系统科学以系统为研究对象，而系统在自然界和人类社会是中普遍存在的。如太阳系是一个系统，人体是一个系统，一个家庭是一个系统，一个工厂企业是一个系统，一个国家也是一个系统，等等。客观世界存在着各种各样的具体系统。为了研究上的方便，按着不同的原则可将系统划分为各种不同的类型。例如，按着系统的形成和功能是否有人参与，可划分为自然系统和人造系统；太阳系就是自然系统，而工厂企业是人造系统。如果按系统与其环境是否有物质、能量和信息的交换，可将系统划分为开放系统和封闭系统；当然，真正的封闭系统在客观世界中是不存在的，只是为了研究上的方便，有时把一个实际具体系统近似地看成封闭系统。如果按系统状态是否随着时间的变化而变化，可将系统划分为动态系统和静态系统；同样，真正的静态系统在客观世界中也是不存在的，只是一种近似描述。如果按系统物理属性的不同，又可将系统划分为物理系统、生物系统、生态环境系统等；按系统中是否包含生命因素，又有生命系统和非生命系统之分，等等。

以上系统的分类虽然比较直观，但着眼点过分地放在系统的具体内涵，反而失去系统的本质，而这一点在系统科学研究中又是非常重要的。为此，钱学森提出了以下分类方法：

根据组成系统的子系统以及子系统种类的多少和它们之间关联关系的复杂程度，可把系统分为简单系统和巨系统两大类。简单系统是指组成系统的子系统数量比较少，它们之间关系自然比较单纯。某些非生命系统，如一台测量仪器，这就是小系统。如果子系统数量相对较多(如几十、上百)，如一个工厂，则可称作大系统。不管是小系统还是大系统，研究这类简单系统都可从子系统相互之间的作用出发，直接综合成全系统的运动功能。这可以说是直接的做法，没有什么曲折，顶多在处理大系统时，要借助于大型计算机，或巨型计算机。

---

① 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统. 自然杂志 1990，13(1)

若子系统数量非常大(或成千上万、上百亿、万亿),则称作巨系统。若巨系统中子系统种类不太多(几种、几十种),且它们之间关联关系又比较简单,就称作简单巨系统,如激光系统。研究处理这类系统当然不能用研究简单小系统和大系统的办法,就连用巨型计算机也不够了,将来也不会有足够大容量的计算机来满足这种研究方式。直接综合的方式不成,人们就想到 20 世纪初统计力学的巨大成就,把亿万个分子组成的巨系统的功能略去细节,用统计方法概括起来。这很成功,是 I. Prigogine 和 Haken 的贡献,它们各自称为耗散结构理论和协同学。

10.2 开放的复杂巨系统

如果子系统种类很多并有层次结构,它们之间关联关系又很复杂,这就是复杂巨系统。如果这个系统又是开放的,就称作开放的复杂巨系统。例如:生物体系统、人脑系统、人体系统、地理系统(包括生态系统)、社会系统、星系系统等。这些系统无论在结构、功能、行为和演化方面,都很复杂,以至于到今天,还有大量的问题,我们并不清楚。如人脑系统,由于人脑的记忆、思维和推理功能以及意识作用,它的输入-输出反应特性极为复杂。人脑可以利用过去的信息(记忆)和未来的信息(推理)以及当时的输入信息和环境作用,作出各种复杂反应。从时间角度看,这种反应可以是实时反应、滞后反应甚至是超前反应;从反应类型看,可能是真反应,也可能是假反应,甚至没有反应。所以,人的行为绝不是什么简单的“条件反射”,它的输入-输出特性随时间而变化。实际上,人脑有 10^{12} 个神经元,还有同样多的胶质细胞,它们之间的相互作用又远比一个电子开关要复杂得多,所以美国 IBM 公司研究所的 E. Clementi 曾说,人脑像是由 10^{12} 台每秒运算 10 亿次的巨型计算机并联而成的大计算网络!

再上一个层次,就是以人为子系统主体而构成的系统,而这类系统的子系统还包括由人制造出来具有智能行为的各种机器。对于这类系统,“开放”与“复杂”具有新的更广的含义。这里开放性指系统与外界有能量、信息或物质的交换。说得确切一些:① 系统与系统中的子系统分别与外界有各种信息交换;② 系统中的各子系统通过学习获取知识。由于人的意识作用,子系统之间的关系不仅复杂而且随时间及情况有极大的易变性。一个人本身就是一个复杂巨系统,现在又以这种大量的复杂巨系统为子系统而组成一个巨系统——社会。人要认识客观世界,不单靠实践,而且要用人类过去创造出来的精神财富。知识的掌握与利用是个十分突出的问题。什么知识都不用,那就回到 100 多万年以前我们的祖先那里去了。人已经创造出巨大的高性能的计算机,还致力于研制出有智能行为的机器,人与这些机器作为系统中的子系统互相配合,和谐地进行工作,这是迄今为止最复杂的系统了。这里不仅以系统中子系统的种类多少来表征系统的复杂性,而且知识起着极其重要的作用。

这类系统的复杂性可概括为:① 系统的子系统间可以有各种方式的通讯;② 子系统的种类多,各有其定性模型;③ 各子系统中的知识表达不同,以各种方式获取知识;④ 系统中子系统的结构随着系统的演变会有变化,所以系统的结构是不断改变的。我们把上述系统叫做开放的特殊复杂巨系统,即通常所说的社会系统。

系统的这种分类,清晰地刻画了系统复杂性的层次,它对系统科学理论和应用研究具有重大意义。从社会系统的最近研究中,也可以看出这一点。研究人这个复杂巨系统可以看作是社会系统的微观研究,而在社会系统的宏观研究方面,根据马克思创立的社会形态概念,任何一个社会都有三种社会形态,即经济的社会形态、政治的社会形态、意识的社会形态,可把社会系统划分为三个组成部分,即社会经济系统、社会政治系统、社会意识系统。相应于三种社会形态应有三种文明建设,即物质文明建设(经济形态)、政治文明建设(政治形态)和精神文明建设(意识形态)。社会主义文明建设,应是这三种文明建设的协调发展。这一结论无论在理论上还是在实践中都有重要意义。从实践角度来看,保证这三种文明建设协调发展的就是社会系统工程。按着系统工程的定义,组织管理社会经济系统的技术,就是经济系统工程;组织管理社会政治系统的技术,就是政治系统工程;组织管理社会意识系统的技术,就是意识系统工程。而社会系统工程则是使这三个子系统之间以及社会系统与环境之间协调发展的组织管理技术。从我国改革和开放的现实来看,不仅需要经济系统工程,更需要社会系统工程。单纯地进行经济体制改革,不注意另外两个子系统的关联制约作用,经济体制改革难以成功。例如“官倒”、党内某些腐败现象、社会风气不正等等,都对经济体制改革造成了严重影响,以至于不得不来治理经济环境,整顿经济秩序。党的十三届五中全会提出的进一步治理整顿和深化改革,就是社会主义制度的自我完善,是中国社会形态的自我完善。这都说明了单打一的零散改革是不行的。改革需要总体分析、总体设计、总体协调、总体规划,这就是社会系统工程对我国改革和开放的重大现实意义。

从以上列举的开放的复杂巨系统的实例中,可以看到,它们涉及到生物学、思维科学、医学、天文学和社会科学理论,所以这是一个很广阔的研究领域。值得指出的是,这些领域的理论本来分布在不同的学科甚至不同的科学技术部门,而且均已有了较长的历史,也都或多或少地用本学科的各自语言涉及开放的复杂巨系统这一思想,如中医理论,但今天却都能概括在开放的复杂巨系统的概念之中,而且更加清晰、更加深刻了。这个事实启发我们,开放的复杂巨系统概念的提出及其理论研究,不仅必将推动这些不同学科理论的发展,而且还为这些理论的沟通开辟了新的令人鼓舞的前景。

10.3 开放的复杂巨系统的研究方法

开放的复杂巨系统目前还没有形成从微观到宏观的理论，没有从子系统相互作用出发，构建出来的统计力学理论。那么有没有研究方法呢？有些人想得比较简单，硬要把11.1节中讲到的处理简单系统或简单巨系统的方法用来处理开放的复杂巨系统。他们没有看到这些理论方法的局限性和应用范围，生搬硬套，结果适得其反。例如，运筹学中的对策论，就其理论框架而言，是研究社会系统的很好工具。但对策论今天所达到的水平和取得的成就，远不能处理社会系统的复杂问题。原因在于对策论已把人的社会性、复杂性、人的心理和行为的不确定性过于简化了，以至于把复杂巨系统问题变成了简单巨系统或简单系统的问题了。同样，把系统动力学、自组织理论用到开放的复杂巨系统研究之中，所以不能成功，其原因也在于此。系统动力学创始人J. Forrester自己就提出[①]，对他的方法要慎重，要研究模型的可信度，但国内有些人对此却毫不担心，"大胆"使用。

另外，也有的人一下子把复杂巨系统的问题上升到哲学高度，空谈系统运动是由子系统决定的，微观决定宏观等等。一个很典型的例子就是"宇宙全息统一论[②]"。他们没有看到人对子系统也不能认为完全认识了。子系统内部还有更深更细的子系统，以不全知去论不知，于事何补？甚至错误地提出"部分包含着整体的全部信息"、"部分即整体，整体即部分，两者绝对同一"，这完全是违反客观事实的，也违反了马克思主义哲学。

实践已经证明，现在能用的、唯一能有效处理开放的复杂巨系统（包括社会系统）的方法，就是从定性到定量的综合集成方法。这个方法是在以下三个复杂巨系统研究实践的基础上，提炼、概括和抽象出来的，这就是：

（1）在社会系统中，由几百个或上千个变量所描述的从定性到定量的综合集成系统工程技术，对社会经济系统的研究和应用。

（2）在人体系统中，把生理学、心理学、西医学、中医和传统医学以及气功、人体特异功能等综合起来的研究。

（3）在地理系统中，用生态系统和环境保护以及区域规划等综合探讨地理科学的工作。

在这些研究和应用中，通常是科学理论、经验知识和专家判断力相结合，提出经验性假设（判断或猜想）；而这些经验性假设不能用严谨的科学方式加以证明，往往是定性的认识，但可用经验性数据和资料以及几十、几百、上千个参数的模型对其确

① Forrester, J. W. Theory and Application of System Dynamics, New Times, Press, 1987

② 王存臻，严春友. 宇宙全息统一论. 山东人民出版社，1988

实性进行检测；而这些模型也必须建立在经验和对系统的实际理解上，经过定量计算，通过反复对比，最后形成结论；而这样的结论就是我们在现阶段认识客观事物所能达到的最佳结论，是从定性上升到定量的认识。

综上所述，从定性到定量的综合集成方法，就其实质而言，是将专家群体（各种有关的专家）、数据和各种信息与计算机技术有机结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来。这三者本身也构成了一个系统。这个方法的成功应用，就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势。

近几年，国外有人提出综合分析方法（meta-analysis）①，对不同领域的信息进行跨域分析综合，但还不成熟，方法也太简单，而从定性到定量的综合集成方法却是真正的 metasynthesis。

10.4　综合集成方法的实例

下面，我们以社会经济系统工程中“财政补贴、价格、工资综合研究”为例，来说明这个方法及其应用。这个案例是成功的。

1979 年以来，由于实行农副产品收购提价和超购加价政策，提高了农民收入，这部分钱是由国家财政补贴的。但是，当时对销售价格没有作相应调整，结果是随着农业连年丰收，超购加价部分迅速增大，给国家财政带来了沉重的负担，是财政赤字的主要根源。这样，造成了极不正常的经济状态：农业越丰收，财政补贴越多，致使国家财政收入增长速度明显低于国民收入增长速度，财政收入占国民收入的比例逐年下降。

财政补贴产生的这些问题，引起国家的极大重视，有关部门提出，如何利用价格、工资这两个经济杠杆，逐步减少以至取消财政补贴。然而，调整零售商品价格必将影响到人民生活水平；如果伴以工资调整，又涉及到财政负担能力、市场平衡、货币发行和储蓄等。这些问题涉及到经济系统中生产、消费、流通、分配这四个领域。

财政补贴、价格、工资以及直接和间接有关的各个经济组成部分，是一个互相关联互相制约的具有一定功能的系统。调整价格和工资从而取消财政补贴，实质上就是改变和调节这个系统的关联、制约关系，以使系统具有我们希望的功能，这是系统工程的典型命题。

---

① Hedges. L、Olk. I. In Statistical Methods For Meta-analysis, Academic Press, 1985
Wolf, F. M. Meta-Analysis: Qualitative Methods for Research, Synthesis, Sage, 1986
Rosenthal. R. Meta-Analytic Procedures for Social Research, Sage, 1984
Light. R、Pillemer. D. Summing Up: The Science of Reviewing Research, Harvard University, Press, 1984

为了解决这个问题，首先由经济学家、管理学家、系统工程专家等依据他们掌握的科学理论、经验知识和对实际问题的了解，共同对上述系统经济机制（运行机制和管理机制）进行讨论和研究，明确问题的症结所在，对解决问题的途径和方法作出定性判断（经验性假设），并从系统思想和观点把上述问题纳入系统框架，界定系统边界，明确哪些是状态变量、环境变量、控制变量（政策变量）和输出变量（观测变量）。这一步对确定系统建模思想、模型要求和功能具有重要意义。

系统建模是指将一个实际关系的结构、功能、输入-输出关系用数学模型、逻辑模型等描述出来，用对模型的研究来反映对实际关系的研究。建模过程既需要理论方法又需要经验知识，还要有真实的统计数据和有关资料。

有了系统模型，再借助于计算机就可以模拟系统和功能，这就是系统仿真。它相当于在实验室内对系统作实验，即系统的实验研究。通过系统仿真可以研究系统在不同输入下的反应、系统的动态特性以及未来行为的预测等等，这就是系统分析。在分析的基础上，进行系统优化、优化的目的是要找出为使系统具有我们所希望的功能的最优、次优或满意的政策和策略。

经过以上步骤获得的定量结果，由经济学家、管理专家、系统工程专家共同再分析、讨论和判断，这里包括了理性的、感性的、科学的和经验的知识的相互补充。其结果可能是可信的，也可能是不可信的。在后一种情况下，还要修正模型和调整参数，重复上述工作。这样的重复可能有许多次，直到各方面专家都认为这些结果是可信的，再作出结论和政策建议。这时，既有定性描述，又有数量根据，已不再是先验的判断和猜想，而是有足够科学根据的结论。以上各步可用框图表示，如图 10-1。

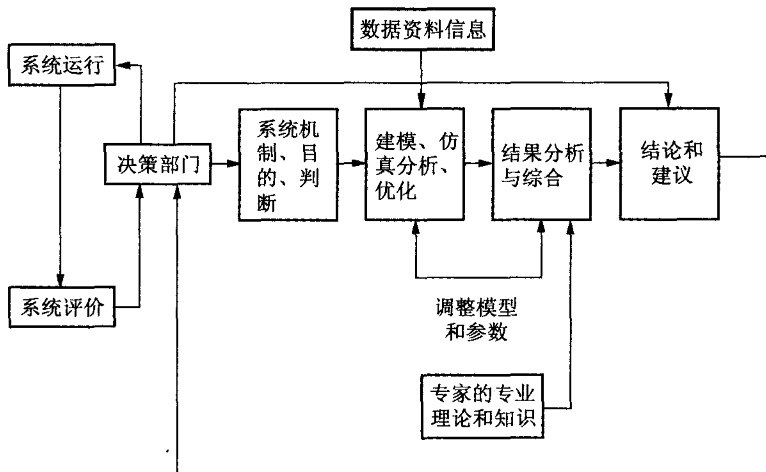


图 10-1　综合集成方法

10.5 综合集成还可以用知识工程

如上所述，综合集成方法取得了很好的效果。在解决问题的过程中，专家群体和专家的经验知识起着重要的作用。在以前，如在 11.4 节所举的实例中，这一综合的过程还没有使用机器，建立模型也是靠人动脑子思考。现在看，我们还可以进一步，在一个系统中加入知识这一极其重要的因素。这就牵涉到知识的表达和知识的处理，实际上就是知识工程的问题了。知识工程是人工智能的一个重要分支，解决问题的办法着眼于合理地组织与使用知识，从而构成知识型的系统。专家系统就是一种典型的知识型系统。专家的一部分作用可通过专家系统来实现，所以专家系统也自然是系统中的子系统。再进一步分析，在前面关于系统分类的讨论中，开放的特殊复杂巨系统居于最高层次，人作为这种系统中的子系统。人不能脱离社会而存在，随着社会的发展，人类创造各种机器来代替体力劳动与部分脑力劳动，结果具有智能行为的机器必然也是子系统。由人、专家系统及智能机器作为子系统所构成的系统必然是人机交互系统。各子系统互相协调配合，关键之处由人指导、决策，重复繁重工作由机器运行。人与机器以各种方便的通讯方式，例如自然语言、文字、图形等，进行人机通讯，形成一个和谐的系统。

近年来知识工程领域中的一些专家认识到以往忽视理论的错误倾向，已在探讨知识型系统研究的方法论问题。知识工程中的核心问题是知识表达，即如何把各种知识，如书本知识、专门领域有关的知识、经验知识、常识知识等，表示成计算机能接受并能加以处理的形式，这是必须解决的基本问题。知识型的系统与以往的动态系统不同，它的特点是以知识控制的启发式方法求解问题，不是精确的定量处理，因为许多知识是经验性的，难以精确描述。对于知识型系统，不能像以往的一些控制系统那样建立定量的数学模型，而只能采用定性的方法。如果系统中包括一些可以定量描述的部件，那么也必然是采用从定性到定量的综合集成方法来进行系统综合。已有许多工作是利用定性推理的概念与建模方法来建立定性模型，进而研究定性推理的。定性建模是一种把深层知识进行编码的方法，关心的只是变化的趋势，例如增加、减少、不变等。定性推理指的是在定性模型上的操作运行，从而得到或预估系统的行为。这里着重的是结构、行为、功能的描述及它们之间的关系。到目前为止，已有三方面代表性的工作。一是 Xerox 公司的 De Kleer 等人从系统的观点出发提出以部件为主(component centered)的模型，认为系统最重要的特性是可合成性，在结构上系统由部件连接而成，系统的行为可由部件的行为推导而得出。他们致力于建立一种能进行解释与预估的定性物理系统。另一是 MIT 计算机科学实验室的 Kaiper 提出以约束为主(constraint centered)的模型。第三是 MIT 人工智能实验室的 Forbus 提出以进程为主(process centered)的模型。他把引起运动和变化的原因

等称为进程，致力于建立进程对物理过程影响的理论。知识工程中研究定性建模与推理的动机是研究常识知识，解决常识知识的表达、存储、推理等。很多专家认为定性建模与推理的方法及理论研究很可能是解决利用常识知识的途径。1988 年欧洲人工智能大会把最佳论文奖授予关于定性物理模型和计算模型的论文，说明人们对这方面的研究所抱的希望。

实际上人工智能领域中的许多重要的工作是从系统的角度考虑的。有一种主张把人工智能的研究概括为是对各种定性模型(物理的、感知的、认知的、社会系统的模型)的获取、表达与使用的计算方法进行研究的学问。这是系统科学观点的反映。当前人工智能领域中综合集成的思想得到重视，计算机统筹制造系统(Computer Integrated Manufacture System，简称 CIMS 系统)的提出与问世就是一个例子。在工业生产中，产品设计与产品制造是两个重要方面，各包括若干个环节，这些环节以现代化技术通过人机交互在进行工作。以往设计与制造是分开各自进行的。现在考虑把两者用人工智能技术有机地联系起来，及时把制造过程中有关产品质量的信息向设计过程反馈，使整个生产灵活有效，又能保证产品的高质量。这种把设计、制造，甚至管理销售统一筹划设计的思想恰恰是开放的复杂巨系统的综合集成思想的体现。

总之，我们把系统的“开放性”和“复杂性”这两个概念拓广之后，对系统的认识就更加深刻，所概括的内容也就更为广泛。这种广泛性是从现代科学技术的发展，尤其是新兴的知识工程的发展中抽象和概括而得来的，有着坚实的基础与充分的根据。在我们阐明了开放的特殊复杂巨系统属于系统分类中的最高层次之后，实际上就把系统科学与人工智能两大领域明显地加以沟通。这样一来各种以知识为特征的智能型系统，如互相合作的人工智能系统、分布式人工智能系统以及实时智能控制系统等都属于一个统一的、明确的范畴。这就有利于去建立开放的复杂巨系统的理论基础，这是当代科学发展的必然结果。

10.6 开放的复杂巨系统研究的意义

从以上所述，从定性到定量的综合集成方法，概括起来具有以下特点：

(1) 根据开放的复杂巨系统的复杂机制和变量众多的特点，把定性研究和定量研究有机地结合起来，从多方面的定性认识上升到定量认识。

(2) 由于系统的复杂性，要把科学理论和经验知识结合起来，把人对客观事物的星星点点知识综合集中起来，解决问题。

(3) 根据系统思想，把多种学科结合起来进行研究。

(4) 根据复杂巨系统的层次结构，把宏观研究和微观研究统一起来。

正是上述这些特点，才使这个方法具有解决开放的复杂巨系统中复杂问题的能

力，因此它具有重大的意义，以下将着重讲讲这个看法。

现代科学技术探索和研究的对象是整个客观世界，但从不同的角度、不同的观点和不同的方法研究客观世界的不同问题时，现代科学技术产生了不同的科学技术部门。例如，自然科学是从物质运动、物质运动的不同层次、不同层次之间的关系这个角度来研究客观世界的，社会科学是从研究人类社会发展运动、客观世界对人类发展影响的角度去研究客观世界的，数学科学则是从量和质以及它们互相转换的角度研究客观世界的……①。而系统科学是从系统观点，应用系统方法去研究客观世界的。系统科学作为一个科学技术部门，从应用到基础理论研究都是以系统为研究对象。在宏观世界，我们这个地球上，又产生了生命、生物，出现了人类和人类社会，有了开放的复杂巨系统。而这类系统在宇观世界也是存在的，例如银河星系也是一个开放的复杂巨系统。这样看来，开放的复杂巨系统概念，已经超出了宏观世界而进入了更广阔的天地。因此，开放的复杂巨系统及其研究具有普遍意义。但是，正如前面已经指出的那样，过去的科学理论都不能解决开放的复杂巨系统的问题，这也是有原因的，可以从历史中去找。

大家知道，长期以来不同领域的科学家们早已注意到，在生命系统和非生命系统之间表现出似乎截然不同的规律。非生命系统通常服从热力学第二定律，系统总是自发地趋于平衡态和无序，系统的熵达到极大。系统自发地从有序变到无序，而无序却决不会自发地转变到有序，这就是系统的不可逆性和平衡态的稳定性。但是，生命系统却相反，生物进化、社会发展总是由简单到复杂、由低级到高级越来越有序。这类系统能够自发地形成有序的稳定结构。

两类系统之间的这种矛盾现象，长时间内得不到理论解释，致使有些科学家认为，两类系统各有各的规律，相互毫不相干。但也有些科学家提出：这种矛盾现象有没有什么内在联系呢？直到20世纪60年代，耗散结构理论和协同学的出现，为解决这个问题提供了一个科学的理论框架。这些理论认为，热力学第二定律所揭示的是孤立系统（与环境没有物质和能量的交换）在平衡态和近平衡态（线性非平衡态）条件下的规律。但生命系统通常都有开放系统，并且远离平衡态（非线性非平衡态）。在这种情况下，系统通过与环境进行物质和能量的交换引进负熵流，尽管系统内部产生正熵，但总的熵在减少，在达到一定条件时，系统就有可能从原来的无序状态自发地转变为在时间、空间和功能上的有序状态，产生一种新的稳定的有序结构，Prigogine称其为耗散结构。这样，在不违背热力学第二定律的条件下，耗散结构理论沟通了两类系统的内在联系，说明两类系统之间并没有真正严格的界限，表观上的鸿沟，是由相同的系统规律所支配。所以，Prigogine在其著作中指出，"复杂性不

---

① 吴义生编. 社会主义现代化建设的科学和系统工程（第六章）. 中共中央党校，1987

再仅仅属于生物学了，它正在进入物理学领域，似乎已经植根于自然法则之中[①]”。Haken 更进一步指出，一个系统从无序转化为有序的关键并不在于系统是平衡和非平衡，也不在于离平衡态有多远，而是由组成系统的各子系统，在一定条件下，通过它们之间的非线性作用，互相协同和合作自发产生稳定的有序结构，这就是自组织结构。

现代科学 20 年来的这一成就是十分重要的，它阐明了长期以来困惑着人们的一个谜。但耗散结构理论、协同学的成功，也使得不少人过分乐观，以为这种基于近代科学还原论的定量方法也可以用到开放的复杂巨系统，从而碰壁！

在科学发展的历史上，一切以定量研究为主要方法的科学，曾被称为“精密科学”，而以思辨方法和定性描述为主的科学则被称为“描述科学”。自然科学属于“精密科学”，而社会科学则属于“描述科学”。社会科学是以社会现象为研究对象的科学，社会现象的复杂性使它的定量描述很困难，这可能是它不能成为“精密科学”的主要原因。尽管科学家们为使社会科学由“描述科学”向“精密科学”过渡作出了巨大努力，并已取得了成效，例如在经济科学方面，但整个社会科学体系距“精密科学”还相差甚远。从前面的讨论中可以看到，开放的复杂巨系统及其研究方法实际上是把大量零星分散的定性认识、点滴的认识，甚至群众的意见，都汇集成一个整体结构，达到定量的认识，是从不完整的定性到比较完整的定量，是定性到定量的飞跃。当然一个方面的问题经过这种研究，有了大量积累，又会再一次上升到整个方面的定性认识，达到最高层次的认识，形成又一次认识的飞跃。

德国著名的物理学家普朗克认为：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物的本身，而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学，通过生物学和人类学到社会学的连续的链条，这是任何一处都不能被打断的链条。”自然科学和社会科学的研究覆盖了这根链条，伟大导师马克思早就预言：“自然科学往后将会把关于人类的科学总括在自己下面，正如同关于人类的科学把自然科学总括在自己下面一样：它将成为一个科学[②]。”我们称这种自然科学与社会科学成为一门科学的过程为自然科学与社会科学的一体化。可以说，开放的复杂巨系统研究及其方法论的建立，为实现马克思这个伟大预言，找到了科学的和现实可行的途径与方法。

在结束这番讨论的时候，我们还要指出：这里指出的从定性到定量的综合集成方法，不但是研究处理开放的复杂巨系统的当前唯一可行的办法，而且还可以用来整理千千万万零散的群众意见，人民代表的建议、议案，政协委员的意见、提案和专家的见解，以至个别领导的判断，真正做到“集腋成裘”。特别当我们引用它把零金

① 尼科里斯，普利高津. 探索复杂性. 四川教育出版社，1986

② 马克思. 经济学——哲学手稿. 北京人民出版社，1957

碎玉变成大器——社会主义建设的方针、政策和发展战略，以至具体计划和计划执行过程的必要调节调整时（这在本文 10.4 节讲的实例中已见一个小小的开端），就把多年来我们党提出的民主集中制原则，科学地、完美地实现了。其意义远远超出科学技术的发展与进步，这是关系到社会主义建设以至实现共产主义理想的大事了。人民群众才是历史的创造者！

11 关于开放的复杂巨系统[①]

解决开放的复杂巨系统问题，要建立从定性到定量的综合集成方法或称为综合集成技术，需要这样的结合[②]。

真正的人的智能，是人大脑高层次的活动，比目前一些人工智能专家考虑问题的层次要高得多。解决这个问题的途径是1988年马希文在一次讨论会上提出的人与机器的结合，单用计算机之类的机器不行，但人需要机器来帮助。所以，外国人好的东西我们要学习，但我不相信他们能解决开放的复杂巨系统问题，这要靠我们自己的努力。

11.1 什么是开放的复杂巨系统

对开放的复杂巨系统，我们可以说：

(1) 系统本身与系统周围的环境有物质的交换、能量的交换和信息的交换。由于有这些交换，所以是“开放的”。

(2) 系统所包含的子系统很多，成千上万，甚至上亿万。所以是“巨系统”。

(3) 子系统的种类繁多，有几十、上百，甚至几百种。所以是“复杂的”。

过去我们讲，开放的复杂巨系统有以上三个特征。现在我想，由这三条又引申出第四个特征：开放的复杂巨系统有许多层次。这里所谓的层次是指从我们已经认识得比较清楚的子系统到我们可以宏观观测的整个系统之间的系统结构的层次。如果只有一个层次，从整个系统到子系统只有一步，那么，就可以从子系统直接综合到巨系统。我觉得，在这种情况下，还原论的方法还是适用的，现在有了电子计算机，从子系统一步综合到巨系统，这个工作是可以实现的。从前我们搞核弹，就是这么干的。因为，核弹尽管很复杂，但理论上仅有一个层次——从原子弹到核弹。国外对于这种一个层次的问题，如混沌，即便是混沌中比较复杂的问题，如无限维

① 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统. 模式识别与人工智能，1991，4(1)

② 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，13(1)

Navier-Stokes 方程所决定的湍流[①]，还有我们在这个学习班上讲过的自旋玻璃，都可以这么处理，他们把这种问题叫复杂性问题。我认为这种所谓的“复杂性”并不复杂，还是属于有路可循的简单性问题。我把这种系统叫简单巨系统。我们所说的开放复杂巨系统的一个特点是：从可观测的整体系统到子系统，层次很多，中间的层次又不认识；甚至连有几个层次也不清楚。对于这样的系统，用还原论的方法去处理就不行了。怎么办？我们在这个讨论班上找到了一个方法，即从定性到定量的综合集成技术，英文译名可以是：Meta-synthetic Engineering，这是外国没有的，是我们的创造。

11.2　建立开放的复杂巨系统的理论

要建立开放复杂巨系统的一般理论，必须从一个一个具体的开放复杂巨系统入手。哪些系统属开放复杂巨系统呢？社会系统是一个开放复杂巨系统。除此以外，还有人脑系统、人体系统、地理系统、宇宙系统、历史（即过去的社会）系统、常温核聚变系统[②]等等，都是开放的复杂巨系统。研究问题要从具体资料入手。例如，社会系统中有区域问题，也有国家问题，还要注意国际问题。如新华社编的《世界经济报道》1990 年第 41 期上刊登日本人的文章[③]，讲的是日本随着经济的发展，将一些劳动密集型产业转移到亚洲“四小龙”，现在“四小龙”又将这些产业向东南亚发展中国家转移。文章说，最后要向中国内地找出路，因为中国很大，人口众多。所以说，中国的社会主义建设，必须考虑国际的影响。只有从一个一个具体的开放复杂巨系统入手进行研究，当这些具体的开放复杂巨系统的研究成果多了，才能从中提炼出一般的开放复杂巨系统理论，形成开放的复杂巨系统学，作为系统学的一部分。20 世纪 50 年代形成工程控制论就是采用这个办法，从一个一个自动控制技术中提炼出来的。这里我们也要指出：在开放的复杂巨系统中，实践经验和资料累积最丰富的是社会系统和人体系统；前者是关系到国家事务的大问题，后者是涉及人民保健医疗的大问题。

然而，由于开放的复杂巨系统是多层次的，其功能状态变化的可能性是非常广

---

① 如果把分子作为子系统，那么从微观层次的分子运动综合上升到宏观层次的 Navier-Stokes 方程，是从微观的混沌到宏观的层流有序；然后 Reynold 数大了，这一层次又不稳定，发生湍流，但全流场，再上一个层次，还是保持一定流形分布的，还是有序。这里宏观层次是可观测的，全流场也是可观测的。下一个层次到上一个层次都是可观测的。每一次综合只隔一个层次，所以这里的问题不属于复杂巨系统，而且下一个层次的混沌正是上一个层次有序的基础。

② 常温核聚变是特异功能的观点首先由陈能宽同志提出。因为是特异功能，所以引起争议。

③ 西太平洋地区产业结构发生连锁式变化. 世界经济报道，1990，10，9

泛的，有可能出现一些超出常规的现象，如人体系统出现的人体特异功能，这是意想不到的，使不少人不能接受，但又是客观存在的。社会主义中国这个社会系统是不是也出现过"特异功能"？20世纪60年代我们搞成原子弹、导弹、人造卫星，世界上有许多人以为不可设想，我看这就是社会主义中国的特异功能。亚运会办得这么好，也是许多人想象不到的。全国第四次人口普查，只用了一年多时间准备和调查登记，这在11亿多人口的大国也是超常的。所以，中国共产党领导的这个社会系统，只要组织得好，是可以作出意想不到的成就，这就是中国这个社会的"特异功能"。我们搞开放复杂巨系统研究的同志，千万要有这个思想准备，不要被自己习惯了的老一套束缚住。

11.3 要有正确的指导思想

研究开放的复杂巨系统要有正确的思想指导，那就是马克思主义哲学思想的指导。因为研究开放复杂巨系统，正如我在一开头所讲的，当然要靠计算机，靠知识系统，靠人工智能等技术手段，但又不能完全依靠这些机器，最终还要靠人，靠人的智慧。如果完全靠机器能解决问题，那就不是开放复杂巨系统了。人的智慧是什么？是马克思主义哲学。哲学是人类知识的最高概括。

最近我读了王东写的讲《列宁的哲学笔记》的书[①]。书中说，建立马克思主义的哲学体系，马克思、恩格斯作过第一次伟大的尝试；狄茨根作过第二次尝试；列宁的哲学笔记是第三次伟大尝试，都未成功。斯大林搞得不好，从哲学上讲，许多东西批错了。而中国革命远比前苏联十月革命要复杂得多，中国革命形成的毛泽东思想，处理许多错综复杂问题确有独到之处。陈志良、杨根、郭建宁三位同志合写的文章[②]，也讲从宏观的、整体的角度处理非常复杂的问题，论述了小平思维上的整体性、系统性、宏观性、战略性等等，这是很正确的。毛泽东思想的核心部分就是这些内容，即抓问题的本质，矛盾的主要方面，注意情况的变化等等。这就教导我们怎样看一个复杂问题，怎样看一个复杂巨系统。其中特别要防止的是头脑僵化，自己形成一个概念就一成不变。开放的复杂巨系统可是千变万化的，我们要有这样的认识。

革命战争年代，党中央、毛主席在延安，没有电子计算机，也没有现在那么多的信息，那时作正确决策靠什么？靠指导思想。所以当时特别强调，实践——理论——再实践。一项政策，一个理论，在实践中发现有不对的地方，立即改正。这些指导思想，对于我们研究开放的复杂巨系统是非常重要的。也就是我们要用正确的哲学思想来指导，也要通过实践，不断修改我们的理论，因为我们处理的问题太复杂

---

① 王东. 辩证法科学体系的列宁构想. 中国社会科学出版社，1989

② 陈志良，杨根，郭建宁. 论邓小平的哲学思维方式. 中央党校：党校论坛，1990，10

了。通过这样的办法提出的理论，即定量的模型。和过去相比，要能适用比较长的时间，即使出现失误的话，损失也不要太大。这也是我们研究开放复杂巨系统的目的。

最后我要附带说一句，吴学谋的泛系理论①②不大好懂，实际上是一种哲学思想，如果其中有什么有用的东西，我们要注意吸取。

11.4　要用思维科学的成果

从定性到定量的综合集成技术，实际上是思维科学的一项应用技术。研究开放的复杂巨系统，一定要靠这个技术，因为首先要处理那么大量的信息、知识。信息量之大，难以想象，哪一个信息也不能漏掉，因为也许那就是一个重要的信息。情报信息的综合，这是首先遇到的问题。过去我在情报会议上讲过一个词，叫资料，信息的“激活”，即把大量库存的信息变成有针对性的“活情报”。汪成为告诉我，外国人也有一个词，英文叫“data fusion”，我看这个词不好，用“information inspiritment”更恰当一些。我们在做定性的工作中，一开始就要综合大量的信息资料，这个工作就要用知识工程，而且一定要用知识工程，因为信息量太大了，光靠手工是无法完成的。还有“人大”、“政协”会上有大量提案，这都是专家意见，都是有根据的，很重要，但也不见得全面，需要将这些意思进行综合，这也要用知识工程、人工智能，这是我们从定性工作开始时要做的一部分。

所以，从定性到定量的综合集成技术是思维科学的应用技术，是大有可为的。应用技术发展了，也会提炼、上升到思维学的理论，最后，上升到思维科学的哲学——认识论。哲学界现在争论的许多问题，如什么是主体，什么是客体，什么是思维，什么是意识等等，都会有一个正确的答案了。从唯物主义的观点来看，这些问题是很清楚的。人认识客观世界靠什么？靠大脑，而大脑是物质的，是物质世界的一部分。人靠实践来认识客观世界。这不过是人脑这一部分物质，通过物质手段，与更大范围的客观物质相互作用的过程。什么主体，什么客体，什么思维，什么意识，都只不过是讨论研究这一相互作用过程中使用的术语而已。每次所认识的，只是客观世界的很小一部分，所以要再实践，再认识，才能不断扩大我们对客观世界的认识，这个过程是无穷尽的。所以，哲学界争论不休的问题，从开放复杂巨系统的观点和从思维科学观点来看，都是很清楚的。因此这里讨论的关于开放复杂巨系统的观点，对于我们认识客观世界的哲学，也有重大意义。

---

① 吴学谋. 从泛系观看世界. 中国人民大学出版社，1990

② 吴学谋. 泛系理论与数学方法. 江苏教育出版社，1990

12 从定性到定量的综合集成技术[①]

处理开放的复杂巨系统，用的是从定性到定量的综合集成技术，下面作者谈谈自己对从定性到定量的综合集成技术的一些认识与体会，打算从下面五个方面来谈：近十年历史的回顾；研究与发展综合集成技术的意义；有关智能问题的一些启迪；建模问题；知识系统与综合集成。

12.1 近十年历史的回顾

我们知道一种科学理论或一个科学领域的建立与当时科学技术发达的程度分不开。20 世纪 90 年代初，开放的复杂巨系统及其方法论[②]这一新的科学领域的形成，是由于系统科学和计算机技术的发展为此创造了条件，是钱学森一系列工作的必然结果，这里对钱学森在系统科学方面的贡献[③]加以回顾是必要的。早在 80 年代初期，他对军事对阵模拟进行了研究，1981 年对 von Neumarm 同 Morgenstern 所建立的博弈论，以及用 Monte Carlo 数值法在计算机上求得结果的方法作了总结，提出能否把博弈论和系统科学结合起来用于结构复杂、成员众多的对阵集团。1981 年夏天到 1982 年 10 月，在指导王寿云编著《现代作战模拟》一书的讨论中，钱学森从 F. W. Lanchester 的工作提炼出半经验半理论的处理复杂对阵问题的方法论。在后来的工作中赋予这一方法论更广泛的涵义：处理复杂行为系统的定量方法学，是科学理论、经验和专家判断力的结合。这种定量方法学，是半经验半理论的。提出经验性假设（猜想或判断），是建立复杂行为系统数学模型的出发点，这些经验性假设（猜想或判断）不能用严谨的科学方式证明，但需要经验性数据对其确定性进行检验。从经验性假设（猜想或判断）出发，通过定量方法途径获得结论。并提出当人们寻求用定量方法学处理复杂行为系统时，容易注意于数学模型的逻辑处理，而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道，这样的数学模型看来“理论性”很强，其实不免牵强附会，从而脱离真实。与其如此，反不如从建模的一开始就老老实实

① 戴汝为. 从定性到定量的综合集成技术. 模式识别与人工智能，1991，4(1)

② 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域 ——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，13(1)

③ 王寿云，戴汝为，陈信，钱学敏. 钱学森传. 科学家传记大辞典. 北京科学出版社

承认理论的不足，而求援于经验性判断，把定性的方法与定量的方法结合起来，最后定量。这样的系统建模方法是建模者判断力的增强与扩充，是很重要的。在以上工作的基础上，钱学森又通过对社会系统、人体系统、地理系统三个系统研究实践的基础上，进一步深入提炼、概括和抽象出开放的复杂巨系统的方法论。提出处理开放的复杂巨系统的方法是从定性到定量的综合集成方法。就其实质而言是将专家群体(各方面有关的专家)、数据和各种信息与计算技术有机地结合起来，把各种学科的科学理论和人的知识结合起来，这三者本身也构成一个智能系统。这个方法的成功应用就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势。综上所述，可以看出一条清晰的线索。

另一方面，近年来计算机技术、人工智能技术等有了迅猛的发展。在国内计算机的推广应用比过去大为广泛，计算机渗透到各个领域。现在计算机不仅仅是用来进行数值计算，而且可以进行符号处理以至知识处理。有人把近 10 年计算机技术的推广称为计算机的第四个浪潮，正致力于发展以 RISC(缩减指令集)技术为基础的工作站，见图 12-1。

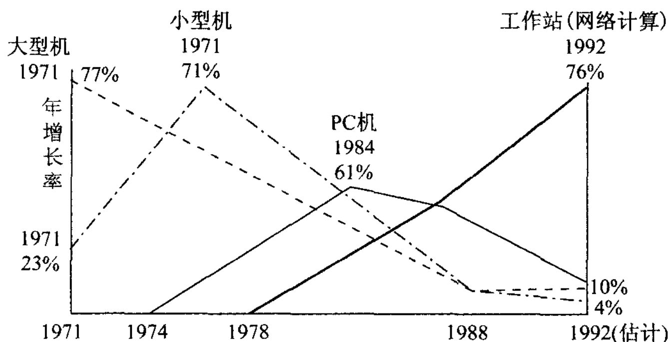


图 12-1 计算机发展的第四个浪潮

为解决在计算机系统中以比较自然的方式表示客观世界，正在研究与开发面向对象(object oriented)的程序开始研制各种专家系统，知识工程这一新领域的形成，被认为是 1975～1985 年期间，人工智能研究方面取得的令人鼓舞的成就。这就为建立方便的人机交互环境打下基础，从而为综合集成定性知识达到对整体的定量认识提供了工具。

12.2 研究与发展综合集成技术的意义

处理开放的复杂巨系统用的是从定性到定量的综合集成技术。一些定性的认识，如专家在错综复杂的情况下的判断，提出的假设等是一种智能行为，是专家拥有的知识、经验的积累，聪明才智的一种集中体现。就当前的技术水平来说，类似于专

家的某些判断与假设等，也可以用计算机，由称为专家系统的计算机软件给出。我们可以认为综合集成是靠人用计算机来综合专家群体的定性认识以及由大量专家系统提供的论断，经过综合的加工处理，从而上升为定量的认识。所达到的定量认识是更完善的智能的一种体现。很明显，综合集成技术包括专家系统的研制。目前的专家系统还不能满足需要，还应该进一步研制性能良好的知识系统，这就要解决一些基本问题，如直感、形象思维、定性认识的表达、经验知识的表达、知识自动获取等。研究和解决这些问题，对我国人工智能的发展将会起到重大的推动作用。

如果把一个专家、一个专家系统都看成一个知识源（或称为智能结点），当前人工智能的一个分支，叫做分布式人工智能（Distributed Artificial Intelligence），简称DAI，是以多个知识源为对象。考虑每个知识源在处理能力、通讯能力方面都有一定的限制，对问题的认识是局部的。DAI研究多个知识源、知识源间的通讯、知识源间的控制关系这三者所构成的系统的整体特性。可以看出，从定性到定量的综合集成技术，在范畴方面概括了DAI，但是更为广泛复杂，层次更高。

对综合集成作进一步的考虑，即使有了大量的定性认识，并不是通过几个步骤，几次就传达到全局的定量认识，所面临的是结构不良（ill structured problem）问题。与智能有关的问题大部是结构不良的，也就是说目标、任务范围、计算允许的操作都不是有明确定义的，需要用一种有反馈的循环过程来加以解决，如图12-2所示[①]。

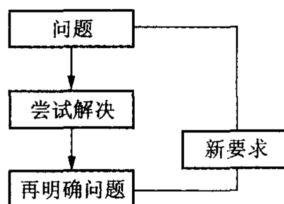


图12-2　解决问题的循环过程

例如，建筑师要设计一座楼房，盖楼的单位提不出明确的要求，不知道楼房里各房间的用途，也不知道需要什么样的材料等等。而建楼的细节又很重要，只有通过设计师与用户互相商讨才能逐渐明确。所以首先要提出楼房主轮廓的初步设计，然后再与用户讨论；用户提出新的要求，按用户提出的要求再进行设计，这样一步一步再进行下去，是一个循环的过程。结构不良的另外一种含义是要解决的问题所包含的知识是不完备的或不一致的。目前的专家系统是以规则作为基础，但是要把专家解决特定问题所涉及的各种知识，如直感、经验知识等都转换成规则的形式是难以做到的，也是行不通的。由一些例子表明，结构不良的问题是由一系列结构良好的小问题构成的。正因为如此，结构不良的问题才能够被解决。在解决小问题的每一

① （美）司马贺. 人类的认知. 北京科学出版社，1986

个阶段里，也提出了下一个待解决的新问题，同时对整个问题的解决也提供了信息。现在研究人工智能程序设计，就要考虑设计成功的程序适合解决结构不良问题，如果解决了，那么也会带动其他与智能有关的问题，意义是很大的。不仅如此，综合集成技术是从系统科学的角度提出来的，是用于处理和解决开放复杂巨系统有关的问题的。当前正在兴起的一个学科“智能控制”是属于开放复杂巨系统的范畴①，有一些概念和问题需要进一步弄清楚和加以解决。现在我们开讨论班，致力于讨论和研究综合定性的认识，达到对整体定量的认识，抓住了关键，难度很大。可以说面临着当前科技的一种挑战，也是一种机遇。其结果必然会将系统科学与人工智能两大科技领域沟通，并进而为自然科学与社会科学的一体化作出贡献，实现伟大导师马克思的预言：“自然科学往后将会把关于人类的科学总结在自己下面，正如同关于人类的科学把自然科学总括在自己下面的一样：它将成为一个科学。”

还有一点是促进思维科学的发展。钱学森在最近给作者的一封信中谈综合集成法时提到：“法”就是工程技术，综合集成法是综合集成工程，英文名字叫 meta-synthetic engineering，属思维科学的应用层次。我们知道智能计算机、人工智能、各种实用的智能技术系统、软件工程、密码技术、文字学等都属于这一实用层次，至于模式识别、知识系统、数学语言学、结构语言学、情报学、科学的方法论等属于思维科学的中间层次。思维学是思维科学的基础层次。基础理论的建立往往需要通过大量实用层次和应用层次的工作，在实践中加以总结和提高。有关智能计算机的研究，在国内已进行了几年。如果综合集成工程开展起来，必将使思维科学有一个大的推进。

12.3　有关智能问题的一些启迪

前面谈到综合集成所面临的问题，有一些是与智能有关的所谓智能型问题，往往无法加以形式化，所以难以用现在的计算机去处理。11.2 节谈到的结构不良问题是由一系列结构良好的问题构成，也可以解决，但缺少系统的方法，也许是碰来碰去，通过实践，获得解答。1991 年 9 月，作者在莫斯科与前苏联科学院崔普金(Tsypkin)通讯院士讨论信息处理与控制问题。早在 20 世纪 50 年代，这位老先生在脉冲调节方面就发表了许多论文与书籍，用的是一整套 Z 变换方法。这次他向我介绍了他最近的工作，对波形信号的特征抽取进行了演示。这种特征抽取，没有有效的办法，是靠人的技巧实现的。他用一堆 Z 变换公式，把特征抽取出来。此外他还介绍了自己长期以来在自适应控制，自学习系统方面的研究，积多年的经验，最近用控制系统的计算机辅助设计方法，采用模型参考，加上各式各样的反馈，最后得到了一个结构相当复杂的系统。崔普金得意地认为，这个系统具有很强的抗干扰能力

① 戴汝为. 智能控制系统. 模式识别与人工智能，1990，3(1)

与自适应能力，是一个智能控制系统。看来他经过多年的研究所取得的效果是不差的，所完成的系统能起到一点点类似于人的作用，是通过长期的实践才达到的，但缺乏理论的指导，看来是一面猜想一面试，碰来碰去，花了很长的时间。如何处理和解决智能型的问题是值得研究的。前些天听了中国科学院系统所吴文俊的一次学术报告。吴文俊关于几何定理的机械化证明非常成功，国外给予很高的评价。解决问题的思路与方法给人以启迪。凡是上过中学，念过几何的人都有体会，证明几何定理，在证明过程中如何添加辅助线等，是学生的聪明与技巧的一种体现。直接把证明几何定理的过程加以形式化是办不到的。吴文俊从解析几何的观点，把几何定理的证明转化为解代数方程，变成分析代数方程根的问题，很自然与我国传统数学联系起来了。如何把问题转化是关键，数学家 Decartes 在世时曾在未发表的著作中提过：

$$\text{任意问题}\xrightarrow{1}\text{数学问题}\xrightarrow{2}\text{代数问题}\xrightarrow{3}\text{解方程组}\xrightarrow{4}\text{解方程}$$

如果能把求解任意问题转化为解方程问题，那么问题就能获得解决了。

回想并总结一下以往人们如何把问题加以转化，对我们今后研究综合集成是很重要的，是有启发性的。20 世纪 50 年代，提出研究人工智能，要模拟人脑的智能行为，如何下手去做是个问题，经过 10 多年，70 年代初，A. Newell（纽厄尔）与 H. A. Simom（司马贺）提出物理符号系统假设，广义上讲，也是一种对问题的转化。所谓符号就是模式（pattern），任何一个模式，只要它能区分于其他的模式，它就是一个符号。物理符号系统的基本任务和功能就是辨认相同的符号和区分不同的符号。物理符号系统的功能归纳起来有下列六种：① 输入符号（input）；② 输出符号（output）；③ 存储符号（store）；④ 复制符号；⑤ 建立符号结构；⑥ 条件性转移（conditional transfer），即可依靠已掌握的符号而继续完成行为。如果一个物理符号能够完成以上全部六个过程，它就是一个完整的物理符号系统。人和计算机都能完成所述六个过程，所以都是完整的物理符号系统。物理符号系统假设（physical symbol system hypothesis），简单地说，就是任何一个系统，如果它能表现出智能的话，它就必能执行上述六种功能。反之也可以说，任何系统，如果具有这六种功能，它就能表现出智能。这里所说的智能就是人类所具有的那种智能行为。人类能够观察、认识外界事物、接受智力测验，通过考试、料理生活中的种种事务，这些都是人类的智能行为。物理符号系统的假设伴随着三个附带的推论。其中一个推论是，既然计算机是一个物理符号系统，它就一定表现出智能，这就为用计算机研究智能行为，实现人工智能打下基础。可以说，目前的计算机，能够实现一部分智能，但不能或难以实现人的直感、形象思维所对应的那种智能，有局限性，所以有必要进一步研究人工智能与智能计算机。目前有人对人工神经元网络缺乏深入的了解，往往夸大其作用，与此相联系，对人工智能加以不实事求是的评论。作者参加了 1988 年在美国底特律举行的国际人工智能联合大会（IJCAI），有 6 000 多人参加。大会把最佳研究奖授予

A. Newell，表彰他在人工智能方面的贡献，是尊重历史发展事实的。

12.4　建模问题

处理开放的复杂巨系统，为方便研究起见，看来也需要建立模型，但不像处理简单系统那样用传统的数学建模，如果要用经典数学来建立某一学科理论，首先就必须把该学科的对象和过程转化成数目字，由于开放的复杂巨系统牵涉到人的许多智能活动，很难用数字表达，建立关于人的智能活动的数学模型是困难的。有关的研究表明，计算机程序语言的形式比经典数学的形式更能表示和描述人的心理现象，描绘开放复杂巨系统的种种模型必须建立在经验和对系统的实际理解上。在从定性到定量的综合集成过程中，专家提出经验性假设(判断或猜想)，往往是定性的认识，但可用经验性数据和资料及几十、几百、上千个参数的模型对其确实性进行检测。面向对象(object oriented)的计算或程序设计被认为当前计算机的主流技术之一。对象可以解释为是一组数据以及对它定义的一组操作，即把数据与操作看成一个整体。面向对象程序设计的根本出发点是追求直接自然地刻画现实世界，追求问题空间程序空间的一致性。这种一致性具体体现为把程序作为模拟客观世界某一方面行为的物理模型，甚至于还可以进一步拓广，把对象考虑为知识与处理知识的方法，形成面向对象的 AI(人工智能)程序设计①，如图 12-3 所示。

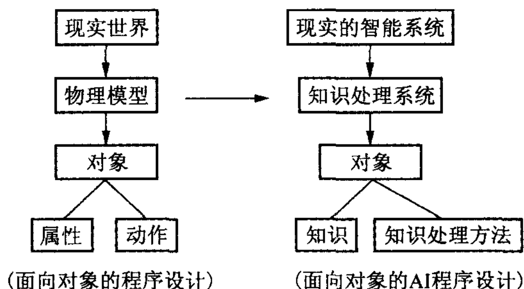


图 13-3　程序设计

在系统科学领域内，面对比较复杂的系统，有的科学家提出，现在已经是时候，需要重新考虑对模型加以表示的基础是什么。需要一种更适合于用户的建模方法，并且使模型的某些部分能够重新使用，如瑞典的科学家以前一直用的是一种“计算机系统模拟语言 CSSL”，已有 20 年的历史，现在有所改变，开始采用面向对象的程序语言。

---

①　王怀民，陈火旺. 基于重写技术和面向对象结构的 AI 基础语言. 许卓群主编. 知识工程进展，1990

12.5 知识系统与综合集成

面向对象的程序设计，是通过对建立开放复杂巨系统的各种层次上的模型来支持综合集成的。就作者的认识，知识系统的研制与设计，或者进一步说，综合各种模型构成的知识系统[①]，是从另一方面对综合集成的支持。通常所说的知识系统包括以规则为基础的专家系统，虽然现在有各种各样用于各种领域的专家系统，但实事求是地分析，这些系统的性能不够理想，远远达不到为综合集成服务的要求。在知识表达，知识获取等方面都存在问题，需要更新与改进，使这种系统运转起来，的确能接近或达到专家的水平。需要花很大力气，才能在处理开放复杂巨系统的时候，一方面由专家群体，一方面用人造的知识系统群体，两者配合工作，人和机器同时发挥作用。

知识系统的研究，可以从不同的方面来进行，有许多工作要做。作者与同事们主要是从模式识别出发，以模式的结构分析为基础，加以开拓，首先把模式识别领域中的两派，统计模式识别与句法模式识别，有机地结合起来，形成模式识别的语义、句法方法。以此为出发点，可以使模式的描述与知识的表达形式上基本一致，从而把模式识别与人工智能沟通和联系起来。更进一步，为获得性能良好的知识系统，把现有的能进行知识表达的模型，如基于逻辑的心理模型、定性模型、可视知识模型以及人工网络模型，加以综合来构成知识系统。这种综合的结果，取长补短，达到各种模型的互相弥补，克服单独运行时的不足。例如把以规则为基础的专家系统与人工神经元网络相辅相成，那么就有利于解决知识的获取问题[②]，因为网络具有通过样本进行学习的功能，已经有一些工作表明这种想法是正确的。从大方向上看，把人工智能中传统的物理符号系统方法与连接机制相结合是明智的。

关于人工智能，有各式各样的说法与定义。其中一种说法是，“人工智能”是一门对各种定性模型(物理的、感知的、认知的、社会系统的模型)的获取、表达与使用的计算方法进行研究的学问。作者认为这是从系统科学的角度的一种说法，是有道理的。但应该加以补充，加入“综合”这层意思，这样就具有指导意义。完整地表述为，“人工智能”是一门对各种定性模型(物理的、感知的、认知的、社会系统的模型)的获取、表达与综合使用的计算方法进行研究的学问。以这样的思路来思考问题，研制综合各种模型的知识系统。这样的知识系统有可能为从定性到定量的综合集成提供强有力的支持。

---

① 戴汝为，王珏主编. 综合各种模型的知识系统. 中国科学院自动化研究所，1990

② 戴汝为，庞真主编. 人机交互、人工神经元网络及其在知识系统中的应用. 中国科学院自动化研究所，1989

13 再谈从定性到定量的综合集成技术[①]

从定性到定量的综合集成法(metasynthsis)是科学家钱学森及其同事为处理开放的复杂巨系统,于1990年初提出来的。主要以“实践论”为立足点,从现代科学技术体系的高度,在对几个实际系统进行了研究分析后,提出把整体与还原论结合起来的从定性到定量的综合集成,由此产生了一门新的“大成智慧工程(metasynthetic engineering)”。1992年钱学森又进一步提出“综合集成研讨厅体系(hall for workshop of metasyntheric engineering)”的构思及建立在现代科学技术体系上的“大成智慧学”,形成了系统的、完整的、具有鲜明特色的学术思想。

13.1 定性到定量综合集成法概念

从定性到定量的综合集成法(Metasynthesis),即是将专家群体(各方面有关的专家)、数据和各种信息与计算技术有机地结合起来,把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来,这三者本身也构成一个系统。这个方法的成功应用就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势。

用综合集成法解决开放复杂巨系统的问题,大致可分为以下步骤:

(1) 明确任务、目的是什么?

(2) 尽可能多地请有关专家提意见和建议。专家的意见是一种定性的认识,肯定不完全一样。此外还要收集大量的有关文献资料,认真地了解情况。

(3) 通过上述两个步骤,有了定性的认识,在此基础上建立一个系统模型。建立模型的过程中必须注意与实际调查数据结合起来,统计数据有多少就需要多少个参数。然后用计算机进行建模的工作。

(4) 模型建立后,通过计算机运行得出结果。但结果的可靠性如何,需要把专家请来,对结果反复进行检验、修改,直到专家认为满意时,这个模型才算完成。

这个方法综合了许多专家的意见和大量书本资料的内容,不是某一个专家的意见,而是专家群体的意见,是把定性的、不全面的感性认识加以综合集成,达到定量的认识。这里充分强调了人的作用及经验知识的重要性,主张人与计算机结合

---

① 戴汝为. 从定性到定量的综合集成(Metasynthesis)——开放的复杂巨系统的方法论,来自科学前沿的报告. 清华大学出版社,1996

起来。

13.2　系统理论发展的三个阶段

回顾系统理论的发展,可以概括为三个阶段:

第一个阶段开始于第二次世界大战。由于战争对科学技术的要求与影响,自动控制系统与控制论蓬勃发展起来,在军事、工业及管理等方面已得到了广泛的应用,并渗透到工程技术,自然科学和社会科学的各个部门,这是工程背景很强的学科。提到这一学科,人们自然地会联想到20世纪50年代《工程控制论》在我国出版后,所产生的巨大影响。早在20世纪40年代内、50年代初我国科学家钱学森对第二次世界大战后迅速发展起来的控制与制导工程技术进行了全面观察。他用比别人更敏锐的眼光去发现、提炼出指导控制与制导系统设计的普遍性概念、原理、理论和方法,于1954年在美国发表了专著《工程控制论》。紧接着俄文版于1956年,德文版于1957年,中文版于1958年相继问世。当时此书几乎为所有自动控制方面的论文以突出的形式所引用。国内外学术界认为,《工程控制论》起到了奠定理论基础,并指出今后进一步研究方向的作用,它是自动控制学科中最具有远见卓识的科学预见的著作。值得强调的是,在这之后,自适应控制已大致形成,并把满足某种指标的控制问题,化成控制变量及系统状态变量在闭区域上变化的变分问题,建立了以极大值原理和动态规划为核心内容的最优控制。到了1960年美国科学家卡门(Kalman)对自动控制理论的发展作了一个基本总结,提出了“现代控制理论”。现代控制理论的提出是与以下两件事紧密相关的:① 空间技术的需要;② 计算机技术的发展而导致对可适应数字计算机的数学模型需求。应该说现代控制理论是1960年至今的自动控制系统与理论获得进展的重要标志。现代控制理论曾经在运动物体的控制等一些领域中(突出的例子是空间技术)得到成功的应用。这一阶段中人们所追求的是研制不用人参与的、完全自动运行的所谓“自主系统”。这类系统在工作环境固定不变,即“干净环境(像空间环境)”中应用是成功的。这类系统属于简单系统的范畴。但在一些复杂环境中,就难以设计和研制能合乎要求的自主系统。这一段工作是发展历史的第一个时代。

有关系统的研究是从简单到复杂的。在现实的生产活动中,所面临的控制问题十分复杂,有的包含着多种物理与化学的过程,有的控制对象具有不确定性而且会发生突变等等。复杂系统的控制问题已经提到了人们的面前。随着信息技术与高、新技术的发展及计算机的推广应用,在国民经济发展与国防建设中涉及全局性影响的系统往往朝着大型化和复杂化发展。关于什么是复杂系统,有各式各样的说法。我们认为具有复杂行为的系统,表现在系统的部件之间,或子系统之间有着很强的耦合作用,具有难以线性化的非线性性质,所以会出现极限环甚至混沌现象。另外,

系统具有高度的不确定性，要求具有实时性，而且难以用传统的方法来建立系统的数学模型。许多工业生产过程就是这种复杂系统的典型例子。另一种情况是被控制对象本身虽然不复杂，但是对这种对象加以控制后所形成的系统是运行于复杂的环境之中，由于环境的复杂而导致在这一环境中能够有效运行的系统也必然是复杂的。典型的例子是研制能为家庭生活服务的机器人。家庭这样的环境往往是很不规整的，因此家用机器人的控制也成为复杂的控制问题。这类问题用传统的控制理论与方法很难奏效。经过较长时期的孕育与发展，国内外已认识到把人工智能的原理与方法及人的经验与智能用于复杂系统的控制是解决复杂系统控制的主要途径，并发展了许多有意义的工作。例如在不了解对象动态特性的情况下，用“模糊控制”对倒摆的控制就是一个成功的例子，这可以认为是发展的第二个阶段，把人的知识经验直接注入到控制系统中去。

在我国，人们正在致力于发展的第三个阶段，解决复杂系统的控制，并且把系统的研究拓广到开放复杂巨系统的范畴。如果对各式各样的系统进行分类，并分析所遇到的各种系统，概言之，不外乎自然系统以及人所制造出来的人工系统两大类。再进一步，根据组成系统的子系统种类的多少和它们之间的关联关系的复杂程度又可以把自然系统和人工系统的种类再分为简单系统及巨系统，以及开放的复杂巨系统。

（1）简单系统。组成系统的子系统数量比较少，子系统之间的关系比较单纯。如一个温度控制系统就是一个人工简单系统。

（2）巨系统。组成系统的子系统数量非常大，成亿、上百亿、千亿。如果系统中子系统的种类不太多，而且它们之间的关联关系又比较简单，则称为简单巨系统。如果子系统的种类很多，并且有层次结构，子系统之间的关系又很复杂，就称为复杂巨系统。如果系统又是开放的，即系统与系统中的子系统分别与外界有各种信息交换，系统中的各子系统能够通过与周围环境的交互作用增加适应能力，这种系统就称为开放复杂巨系统，例如生物体系统、人脑系统等。大多数的人造系统都是简单系统，如一般的控制系统或信息系统，而且不具有开放性。庞大的自动化工厂也只不过是人工的大系统而已。

（3）开放的复杂巨系统。这种系统无论在结构、功能、行为方面都十分复杂，以至于到现在为止，大多数性能还不清楚。

13.3　开放的复杂巨系统的性能

（1）开放性。系统本身与系统周围的环境有物质的交换、能量的交换和信息的交换。

（2）巨系统。系统所包含的子系统很多，成千上万，甚至上亿万。

(3) 复杂性。子系统的种类繁多,有几十,上百,甚至几千种。

(4) 多层次。已经认识得比较清楚的子系统到可以宏观观测的整个系统之间层次很多,甚至有多少个层次也不清楚。

综合集成方法是在三个开放复杂巨系统研究实践基础上提炼、概括和抽象出来的:

(1) 在社会系统中,由几百个或上千个变量所描述的定性定量相结合的系统工程技术,对社会经济系统的研究和应用。

(2) 在人体系统中,把生理学、心理学、西医学、中医学和传统医学等综合起来研究。

(3) 在地理系统中,用生态系统和环境保护及区域规划等综合探讨地理科学工作。

13.4 定性到定量综合集成法是处理复杂巨系统的重要思路

面对开放的复杂巨系统,如何处理与这类有关的问题呢? 以往人们习惯采用的把一个复杂问题分解为一些较小的、比较简单的问题加以处理的还原论方法往往不能适用了。在科学的发展历史中,经验主义的自然观,笛卡儿倡导的分析方法,牛顿力学的机械论图景,奠定了以往还原论在科学领域中的主导地位。这些伟大先驱的思想与成就使科学技术得到蓬勃发展,促进了人类文明达到前所未有的高度,其辉煌的功绩将永载史册;但另一方面也留下了巨大的阴影。由于还原论的盛行,逐渐形成并不断强化了划分专业、学科的传统,这种专业化、学科化、纵深化的状况到 20 世纪已成为一种习以为常的格局,在引导科技界不断取得新成就的同时也带来了很大的局限性,束缚了人们的思想。

一些杰出的物理学家,早已看到还原论的局限性,例如德国的物理学家普朗克就有过精辟的论述:

科学是内在的整体,它被分解为单独的整体不是取决于事物的本身,而是取决于人类的认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学,通过生物学和人类学到社会学的连续的链条,这是任何一处都不能被打断的链条。

20 世纪 90 年代,为处理开放的复杂巨系统,提出了从定性到定量综合集成法(metasynthesis)。在这项工作的基础上,钱学森于 1992 年 3 月,进一步提出"从定性到定量综合集成研讨厅"体系(hall for workshop of metasynthetic engineering)。他的构思是把今天世界上千百万人的聪明才智和已经不在世的古人的智慧都综合起来研讨厅体系体现了它的构思者在长期的科研实践过程中受益于"讨论班(workshop)"的心得与经验(有好的学术带头人,能充分发扬学术民主,不论职位高低均能参与讨论,无保留地敞开思想,与众交流,知错就公开改正。培养人们在众多尖锐质

问下，于短暂瞬间阐明自己观点的能力，有这样的学术环境，才能成为讨论班)，及对当代计算机软硬件环境的重要意义的了解。同时研讨厅体系还体现了把自然科学、社会与哲学三者相结合所形成的观点。最后还需要说明，研讨厅体系中的人并不是未加训练过的老百姓，而应该是根据我国发展尖端技术的经验，如同曾经培养出来的那种具有高度的革命觉悟，高度的组织纪律性，高度的科学性的人；研讨厅体系中的“厅”并不一定是一个大厅，也可以是由高速信息网络，现代化的通信设备及计算机的软硬件构成的、使人们共同讨论与解决问题时有身临其境之感的“灵境(virtual reality)”技术环境。这种“厅”可以有力地提高人的创造力。

应该强调的是从定性到定量的综合集成研讨厅体系设想，一方面，是在系统中把以往只能体现出“个体”的经验知识上升为能体现出“群体”的经验知识，这些知识还可以通过高速信息网为大众所共享。另一方面是用语言和符号表达连接起来的知识体系来提高人的意识，并把意识提高到思维。以往人工智能的研究，主要是立足于以物理符号系统为基础的符号处理方法，知识就是用符号来加以表达的。在这方面已经积累了丰富的经验。最近，国外心理学家重新发掘出 20 世纪 30 年代被埋没的前苏联心理学家 Ley Vygotsky 的学说，该学说认为语言在人的意识中起着中心作用。人与计算机借助高速信息网进行合作，这种人机结合的方式就大大有利于加强人的意识，促进人的思维活动，提高学习效率。这也就是“信息高速公路”建成后，在教育方面会起到十分积极的作用的原因所在，研讨厅体系可以说是这一思想的进一步发展。

从定性到定量的综合集成方法体现了把人的心智(human mind)和机器的“智能”两者结合起来。这对系统与智能的研究来说，是一个带有根本性的转折，把群体专家的智慧注入系统中，从此进入“人机结合的大成智慧”的新时代。

总而言之，各门科学研究的对象都是统一的物质世界，区分只是研究的角度不同，承认上述观点，这就从根本上拆除了以往各门学科之间仿佛永远不可逾越的中界，也必然使辩证唯物主义哲学与各门科学内在地、紧密地熔铸在一起，体现了集大成的智慧，构成统一、完整的现代科学技术体系。应该说，20 世纪 90 年代初，我国学者为处理开放的复杂巨系统，提炼出“从定性到定量的综合集成法”以及 1992 年形成的“研讨厅体系”是信息技术高度发展的必然产物，是科学方法论的一个突破，其影响是十分深远的。

14 复杂巨系统科学[①]

开放的复杂巨系统(简称复杂巨系统)及其方法论是我国科学家钱学森对系统科学加以开拓,于20世纪80年代末总结和提炼出来的。对于自然界和人类社会中一些极其复杂的事物,从系统学的观点来看,可以用开放的复杂巨系统来描述。处理这种复杂巨系统,在目前只能用从定性到定量的综合集成法(Metasynthesis)。以此方法为基础,开创了复杂巨系统科学。

20世纪80年代初,在美国新墨西哥州圣塔菲研究院(Santa Fe,SFI),以三位诺贝尔奖获得者为代表的一批科学家,致力于发展他们称之为"复杂性科学(science of complexity)"的一场科学革命。复杂巨系统科学与复杂性科学都是当前国内外关注的、以多学科交叉与整合为特点的前言科学。

14.1 引言

由于国内外广大科技人员的协同劳动,我国科学家钱学森于1981年提出三个崭新的科学技术大部门:系统科学、思维科学和人体科学[②]。并认为推动系统科学研究的是现代化组织和管理的需要;推动思维科学研究的是计算机技术革命的需要;而推动人体科学研究的是开发人的潜力的需要。在这近15年期间,他对这三个领域作出了大量创新性的工作,包括对系统科学进行了开拓,于20世纪80年代末总结和提炼出来"开放的复杂巨系统"的概念。《自然杂志》1990年第1期发表了钱学森、于景元、戴汝为三人署名的一篇论文"一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论",首次向世人公布了这一新的科学领域及其基本观点:对于自然界和人类社会中一些极其复杂的事物,从系统学的观点来看,可以用开放的复杂巨系统来描述。处理这种开放的复杂巨系统,在目前只能用从定性到定量的综合集成法。1992年初,钱学森结合他几十年来参加各种学术讨论会(seminar)的经验,加上现代新的科技成果,如情报信息技术、人工智能和灵境技术等,提出建设从定性到定量综合集成研讨厅体系。这就使得综合集成法有了一个可操作的具体系统。1992年底他又进一步提出,"要把人的思维:思维的成果,人的知识、智慧以及各种情报、资料统统

---

① 戴汝为. 复杂巨系统科学——一门21世纪的科学. 自然杂志,1997,19(4)

② 钱学森. 系统科学、思维科学与人体科学. 自然杂志,1981,4(1)

集成起来。我看可以叫大成智慧工程。中国有‘集大成’之说，集其大成，得智慧嘛”。

开放的复杂巨系统的诞生有极其重大的意义，但刚开始时并没为广大的科技界人士所认识。经过六年之后，于1997年1月6日～1997年1月9日在北京举行了题为“开放的复杂巨系统的理论与实践”的第68次香山科学会议。会议由宋健和戴汝为两位院士担任执行主席。钱学森向会议送交了他的书面发言，参加讨论会的有11位院士和来自全国各地的多个领域(系统科学、数学、物理、生物、化学、计算机、软科学、军事、经济、气象、石油、化工、建筑、材料、认知科学、人工智能、社会科学、哲学等)的近50名专家学者，是一次学科跨度很大的、探讨21世纪科学发展的讨论会。

通过大会报告和相关的讨论，大家对开放的复杂巨系统及其方法论、研讨厅体系、大成智慧工程等都有了进一步的理解和更深的认识。一致认为这是一个涉及基础理论、高新技术和有重大实际应用的新科学领域。

14.2 SFI的一场科学革命

20世纪80年代，一场跨学科、交叉学科融会的科学革命正在兴起，在美国新墨西哥州，几位罗斯阿尔莫斯国家实验室(Los Alamos National Lab.，这个实验室在第二次世界大战中，汇集了一批著名的物理学家，研制原子弹而闻名于世)的元老，他们不满于当时进行跨学科研究的条件的局限性，在该实验室附近55英里的圣塔菲，筹建一个圣塔菲研究院。他们先后邀请了三位诺贝尔奖获得者：夸克理论的创始人、加州理工学院的Murray Gell-Mann，斯坦福大学的经济学家Kenneth J. Arrow以及普林斯顿大学凝聚态物理学家Philip W. Anderson，另外还有一些年轻的科学家。形成了年轻的科学家可以和世界级的大师携手合作的局面，聚集了一批不同领域(生物学、经济学、计算机科学、物理学、数学、哲学等领域)的科学家，他们热衷于不同学科之间的深入与互相影响，在SFI安排了经济、物理、生物、计算机、考古、政治学、人类学等领域中的学者的对话与研究，试图在各种不同的复杂系统之间找出一些共性。SFI的科学家们摆脱固有学科一些观点的束缚，探索未知的新天地，进行一场跨学科、学科大整合的科学革命，致力于他们称之为复杂性科学的开创，所进行的科学发展模式是史无前例的。

关于复杂性科学的一些来龙去脉，SFI的首任院长柯文(George A. Cowan，费米奖的获得者)在1994年SFI举行的一次学术会议的开幕式上作过简单的叙述[①]：

① Cowan. A. Conference Opening Remarks, In: Cowan. A、Pines. D、Meltzer. D. et al. Complexity, Models and Reality, Addison-Wesley, 1994

复杂性作为一门学科，及现代唤醒复杂性兴趣的起源地是维也纳。1928 年贝塔朗菲(von Bertalanffy)完成描述生物有机体系统的毕业论文。在此之前的若干年，怀特海(Alfred North Whitehead)在《科学和现代世界》上以"有机体的哲学"一文，描述了相类似的见解。自此以后的 20 年，在这方面作出实质性贡献的人及其著作有：马卡洛赫和匹茨(McCulloch and Pitts)的神经网络(neural network)、冯·诺依曼的元胞自动机(cellular automata)和复杂性(complexity)以及维纳(N. Wiener)的控制论(cybernetics)。到了 20 世纪 50 年代以后，尽管普利高津(Prigagine)及哈肯(Haken)做出过重要的贡献，但关于复杂性的研究，看来较为缓慢。从 20 世纪 90 年代开始，SFI 致力于复杂性科学的各有关部分的工作。

柯文对复杂性研究发展的来龙去脉的叙述，也可以说是系统科学发展的粗线条；Bertalanffy、Wiener、Prigagine 及 Haken 都是系统科学的先驱者。德国的系统科学家 Haken 还说过："系统科学的概念是中国学者较早提出来的，这对理解和解决现代科学、推动它的发展是十分重要的。中国是充分认识到系统科学巨大重要性的国家之一。"由于跨学科研究的趋势越来越明显，到了 20 世纪 90 年代，通过 SFI 科学家们的努力，使得复杂性问题的研究变得清晰，而且变得丰富多彩。

90 年代初，有关复杂性的研究与探讨，已经引起我国一些科技人员的关注。1991 年 1 月，在中科院张焘等的倡议下，并得到一批老科学家的热情支持，由周光召院长主持，举行过一次"复杂性科学学术讨论会"。由于当时对圣塔菲研究院的一些研究情况与结果不够了解，这一新兴科学尚属于众说纷纭的状况，但讨论交叉学科的发展，引起大家很大的兴趣。经过几年的探索后，对复杂性的研究有了明显的进展。1994 年 9 月进行过一次题为"开放的复杂巨系统方法论"的香山学术会议。这两次会议对推动复杂性的研究，起到了积极的作用。

14.3 还原(reduction)与突现(emergence)

复杂性科学中的"复杂"实际上蕴含着"复杂多样"与"层次结构"两个特点。这门新兴科学探索的对象，从一个细胞呈现出来的生命现象到大脑的结构及心智、股票市场的涨落、社会的兴衰及人体的免疫系统等。这些系统都有一些共同的特点，就是它们在变化无常的活动背后，呈现出某种捉摸不定的秩序。复杂性科学试图探索掌握不同层次的复杂系统活动的原理。乍一看来，似乎与传统的科学没有什么区别，但从科学方法论的指导思想来看，实际上远非如此。回顾科学发展的历史，科学还原论的思潮主导着以往 200 年来的科学发展，并取得了辉煌的成就。从牛顿、爱因斯坦，到玻耳、海森堡等物理学界的先驱，都是试图用简洁的数学公式来描述自

然。单纯与真实成了科学之美的另一种诠释①。对还原论最早感到不安的是科学哲学家。哲学家以一贯审慎的态度提出问题:知道了部分组成的性质后,就可以掌握全体吗?波普(Karl R. Popper)也曾提出过质疑:一个两只耳朵听不见,且从未听过音乐的物理学家,是否只要研究贝多芬的身体或脑的物理状态,就能写出他所有的交响曲?这当然带有哲学家的夸张,但是科学家早就注意到,部分与整体之间存在着一些不连续的对应关系。SFI的凝聚态物理学家Anderson的前半生的学术生涯是在贝尔实验室(Bell Lab.)度过的,而该实验室本身就具有跨学科的研究环境。对于跨学科的研究,说起来容易,但在学术界,各种惨遭失败的新奇研究院不胜枚举。他观察到一个令人伤感的例子——威风凛凛的普林斯顿高等研究院,大名鼎鼎的奥本海默、爱因斯坦、冯·诺依曼曾经在那里工作过,这座在数学领域有杰出成就的高等研究院,一批聪明绝顶的科学家各自埋头于自己的研究,绝少彼此交谈;就跨学科的研究而言,可以说是彻底地失败,Anderson还注意到很多优秀的科学家到了高等研究院后,从来没有达到他们应有的成就!他首先承认,还原论有其"在哲学上准确无误"的形式,也就是相信宇宙是由自然法则所主宰,大多数科学家都全心全意地相信这个说法;事实上很难想象,如果他们不相信这一点的话,科学如何诞生,但是相信自然法则并不意味着只有基本定律和基本粒子值得研究。他于1972年在《科学》期刊上刊登了一篇文章,谈到"能够把万事万物还原成单纯的法则,并不表示就有能力以这些法则重新构建整个宇宙;事实上基本粒子物理学家告诉我们的自然法则越多,这些基本法则似乎就越和其他科学领域的问题及现实社会脱节"。

为了说明复杂性问题与粒子物理的研究的不同,Anderson以水为例,水分子并不复杂,由1个大的氧原子和2个小的氢原子组成。水分子的活动由原子物理方程式所支配,如果把数不清的水分子放到一个锅里加温,水会慢慢滚动翻腾,发出响声,无数个水分子最终拥有一种特性——液态。这种特性是分子单独不曾拥有的,那些原子物理方程式丝毫没能告知大家这种特性,液态是"突现的(emergent)",而突现的特性会产生突现的行为,例如把大量水分子冷却到摄氏零度,它们就突然不再骚动而会经历"相变(phase transition)",锁定成晶体状的规则排列,也就是成为冰;或反其道而行之,把水加热会变成水蒸气,而任何一种相变对单独的水分子都没有任何意义。总之,关键的问题在于,当许多小的组成部分(如分子)彼此相互作用后,整体会出现"突现(emerge)"产生一个独特的、新的性质。

其实,德国著名物理学家普朗克早就从正面论述应该怎样看待科学:科学是内在的整体,它被分解为单独的整体,不是取决于事物的本身,而是取决于人类的认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学,通过生物学和人类学到社会学的连续的链条,这是任何一处都不能被打断的链条。这真是远见卓识。由于科学还原论具

① 复杂:诞生于秩序与混沌边缘的科学.陈玲译.北京:生活·读书·新知三联书店,1997

有局限性，复杂性科学需要采用以整体着眼与还原方法相结合，或者按中国人的概括，需要以整体论和还原论相结合的系统论作为发展 21 世纪新兴科学的指导。

14.4 大成智慧

在 SFI 的“探险”进行时，我国科学家钱学森埋头于跨学科的研究，致力于发展前沿科学，发表了“系统科学、思维科学与人体科学”的文章，他认为这三个新的科学技术部门都有强大的生命力。1983～1987 年期间，他在北京的某研究所，指导“人体科学”的讨论会。每次会上他都有报告和讲话，在 1984 年 3 月作了明确的阐述[①]：新的科学革命，将会大大开阔我们的眼界，给我们新的力量。比如说，要重视系统工程，这是一个技术革命。但系统工程要发展，还要有系统科学。现在我们就处在系统科学大发展的前夕，这个科学革命不久将会到来。还有一个就是人的思维。在 20 世纪初，巴甫洛夫在科学研究上开始揭示精神和物质、意识和大脑之间的关系。从前这中间是有墙的，现在把它打破。研究人的思维，现在这个方面的研究工作很有希望。所谓人工智能就是想打破这堵墙。人造的机器也让它有一部分人的思维活动。再有人体科学，这也是深刻地认识人到底是怎么回事。这对于人的发展会起很大作用。系统科学、思维科学、人体科学，都是在不久的将来要出现的新的科学革命。我们马克思主义者就是要有科学的预见性，我们不是等着事情来了应付一下，我们要有预见，有计划地推动这些科学的发展，来迎接新的革命。1986 年他开始在北京指导思维科学的讨论会(1987 年的讨论会因故停止)；1986 年至 90 年代初期，他亲自指导一个“系统学”讨论班，开始了定期的学术讨论，同时与一些不同领域的科技人员进行广泛的交流，逐渐形成一个学术集体，学术研究持续至今。这个学术集体以科学民主为旗帜，汲取东西方文化的精华，对复杂巨系统有关的基本问题进行了长期的研讨。事实证明，中国科学家不仅参与了这场人类共同的科学革命，而且对系统科学进行了广泛而深入的探索，并做出了重要贡献。这集中表现在提炼出“开放的复杂巨系统”概念，以及处理这类系统的方法论。这一方法论的产生是科学研究长期实践的结果，是经验的总结。这里我们首先从半经验理论的发展方面谈一谈。

在解决实际问题时，人根据自己的经验所给出的猜想与判断是十分重要的，也就是说，对难以用严格的数学理论解决的实际问题，只能采用半经验的理论，也根据大量实践经验及仔细观察提出一种猜想与假设，通过实验加以验证；如果与实验结果相符合，就可以用来解决实际问题。半经验的飞行理论的成功就是一个例子。在 19 世纪，数学家和力学家们如牛顿(Newton)、达朗贝尔(D' Alembert)等发展的流

---

① 钱学森. 人体科学与现代科技发展纵横观. 北京人民出版社，1996

体力学数学理论，与实际的飞行问题脱节，以致1879年大英航空协会第14届年会中有过如下记载“就飞行而言，数学迄今对我们是完全没用的”。后来，以乔治元·凯莱(George Cayley，1773～1875年)为代表的半经验飞行理论出现。他在19世纪头10年间，提出两个重要的正确的猜想：作用在平直翼面上的升力与攻角成正比，而不是与攻角的平方成正比；另一个猜想是向上弯曲的弧形翼在零攻角时仍然表现有正的升力。到20世纪初，在数学家、力学家与设计师的合作下，两种互无联系的飞行理论开始汇合，并促进了现代飞行理论的实践。

钱学森在美国20年的学术生涯中，亲自经历与参与了现代应用力学的发展过程。回国后，在20世纪80年代初期，他对军事对阵模拟进行了研究，1981年对von Neumann同Morgenstern所建立的博弈论，以及用Monte Carlo数值法在计算机上求得结果的方法作了总结，提出能否把博弈论和系统科学结合起来用于结构复杂、成员众多的对阵集团。在后来的工作中赋予了这一方法论更广泛的涵义：处理复杂行为系统的定量方法学，是科学理论、经验和专家判断力的结合。这种定量方法学，是半经验半理论的。提出经验性假设(猜想或判断)，是建立复杂行为系统数学模型的出发点，这些经验性假设(猜想或判断)不能用严谨的科学方式证明，但需要经验性数据对其确定性进行检验。从经验性假设(猜想或判断)出发，通过定量方法途径获得结论。后来，他又在对社会系统、人体系统、地理系统三个系统研究实践的基础上，进一步深入提炼、概括和抽象出处理开放的复杂巨系统的方法论。提出处理开放的复杂巨系统的方法是从定性到定量的综合集成方法。就其实质而言是将专家群体(各方面有关的专家)、数据和各种信息与计算技术有机地结合起来，把各门学科的科学理论和人的知识结合起来，这三者构成系统。这个方法的成功应用就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势。它的应用可以分几个步骤：第一，明确任务、目的是什么；第二，尽可能多地请有关专家提意见和建议，此外还要收集大量有关文献资料，获得定性知识。在此基础上，要通过建立一个系统模型，加以搜索。在建模时，必须考虑到与实际调查数据结合起来，统计数据有多少就需要多少个参数。必须用计算机软硬件环境完成建立模型的工作，并通过计算机得出结果。但结果如何，需要把专家请来反复进行检验、修改，直到专家满意。这一过程综合了大量的专家猜想及判断和大量书本资料的知识和信息，不是某一专家的意见，而是从许多专家定性的、不完全定性的认识，到综合的定量认识。

开放的复杂巨系统是各种系统中最为复杂的一类系统，对这类系统的研究，当然也要考虑复杂性问题，他给出复杂性的定义：

“复杂性”是开放的复杂巨系统的特征。“复杂性”问题是开放的复杂巨系统的动力学，或开放的复杂巨系统学的问题。

由于开放的复杂巨系统把复杂系统、复杂巨系统、开放的复杂系统等作为特殊情况，所以复杂性的研究也把这些系统的动力学特性概括在其范畴之中，这就对复

杂性的研究方向有一清晰的把握。

1992年3月，他进一步提出"从定性到定量综合集成研讨厅"体系(hall for workshop of metasynthetic engineering)。他的构思是把今天世界上千百万人的聪明才智和已经不在世的古人的智慧都综合起来。研讨厅体系体现了它的构思者在长期的科研实践过程中都受益于"讨论班(workshop)"的心得与经验(有好的学术带头人，能充分发扬学术民主，不论职位高低均能参与讨论，无保留地敞开思想，与众交流，知错就公开宣布更正。培养人们在众多尖锐质问下，于短暂瞬间阐明自己观点的能力，有这样的学术环境，才能称为讨论班)及对当代计算机软硬件环境的重要意义的了解，同时研讨厅体系还体现了把自然科学、社会科学与哲学三者相结合所形成的观点。最后还需要说明，研讨厅体系中的人并不是未加训练过的老百姓，而应该是根据我国发展尖端技术的经验，如同曾经培养出来的那种具有高度的科学性——高度的革命觉悟、高度的组织纪律性的人；研讨厅体系中的"厅"并不一定是一个大厅，而是由高速信息网络、现代化的通信设备及计算机的软硬件构成的、使人们共同讨论与解决问题时有身临其境之感的"临境(virtual reality)"技术环境。这种"厅"可以有力地提高人的创造力。这一方法的精髓是把人的"心智(human mind)"和机器的"智能"两者结合起来。这对系统与智能系统的研究来说，是一个带有根本性的转折，从此进入"人机结合的大成智慧"的新时代。把大成智慧工程进一步发展，在理论上进一步提炼成一门学问，就是大成智慧学。它是以马克思主义辩证唯物论为指导，利用信息网络以人-机结合方式，集古今中外知识、大成智慧的学问。

以上所述是在"现代科学技术体系"的总的框架下发展起来的，是跨学科的，充分体现了多学科融合的思想。这一构思是经过多年而形成的，在20世纪80年代初，该体系包括六大科学技术部门①，后来增加了地理科学、建筑科学、行为科学等共计十一大科学技术部门，其中的系统科学、思维科学、人体科学、地理科学及建筑科学等，与开放的复杂巨系统有着密切不可分的关系。

14.5 人-机的结合

前面所谈的从定性到定量的综合集成法以及从定性到定量的综合集成研讨厅体系中，重要的论点之一是人与计算机的结合。自从计算机问世以来，所形成的局面，开始是人伺候计算机，对机器不熟悉的人用起机器来颇为困难。于是人们就致力于解决人机接口的问题，提供用户用起来方便的接口，逐渐向计算机伺候人的途径发展。这里所要说的人-机的结合其意义要深刻得多，也就是说，面对着如何处理

① 钱学森. 科学的艺术与艺术的科学. 北京人民出版社，1994

的复杂巨系统这类问题的挑战，所采取的对策是把人的心智（human mind）与机器的“高性能”两者相结合；从信息获取、信息存储和信息处理的观点来看，计算机是极好的工具，它的海量存储、快速处理是前所未有的。从开初处理数据信息，到进一步处理模式信息（pattern information），更进一步处理知识信息（knowledge information）表现出极为有效的能力，但它的灵活性远不如人。应该清醒地看到，计算机虽好，其威力之大，以致把人类从工业化社会推进到信息化社会，但它也有局限性[①]。

另外，非常重要的事实是“心智”的巨大作用。人脑是信息处理的极好的器官，人脑是思维产生的物质基础。思维可以分为逻辑思维、形象思维以及创造思维。逻辑思维可以用计算机模拟，如人工智能领域中的定理证明，国内开展的几何定理的机械化证明，可以说属于逻辑思维的范畴；另外一种重要的思维形式是形象思维，如模式识别，科学中的启发性，以及人猜想与判断等，具有只可意会而不可言传的性质，只能用比喻来加以描述，要用计算机来模拟形象思维，看来是目前达不到的事；人的思维过程是逻辑思维与形象思维并用，而创造思维是逻辑思维与形象思维的结合，创造思维是智慧的源泉。

关于人的心智，我国哲学家熊十力把智慧概括为“性智”与“量智”两种类型。我们可以这样理解：性智是一种从定性的、宏观的角度，对总的方面巧妙地加以把握的智慧，与经验的积累、形象思维有密切的联系。前面谈到过形象思维的研究方法是宏观方法，与此吻合，人们通过文学艺术活动及不成文的实践感受得以形成；量智是一种定量的、微观的分析、概括与推理的智慧，与严格的训练、逻辑思维有密切的联系。人们通过科学技术领域的实践与训练得以形成。人-机的结合是以人为主，“机”不是代替人，而是协助人，从信息处理的角度来考虑把人的“性智”与“量智”与计算机的“高性能”信息处理相结合，达到定性的（不精确的）与定量的（精确的）处理互相补充。目前人们清楚地认识到计算机能够对信息进行精确的处理，而且速度之快是惊人的，但它的不足之处是定性（不精确）地处理信息的能力却极差。尽管研究者将一系列近于定性处理信息的方法引入计算机系统中，企图完善其处理能力，但对于真正复杂的问题还是难以解决。与此相反，与计算机相比较，人处理精确信息的能力是既慢又差，但人定性处理信息的能力是十分高明的。明智的方法是在解决复杂问题的过程中，能够形式化的工作尽量让计算机去完成；一些关键的、无法形式化的工作，则靠人的直接参与，或间接的作用，构成人-机结合的系统。这种系统既体现了心智的关键作用，也体现了计算机的特长。这样一来不仅能处理极为复杂的问题，而且通过从定性到定量综合集成，达到集智慧之大成，所以有理由把人-机结合的综合集成概括为“大成智慧”。

---

① 戴汝为，王珏，田捷. 智能系统的综合集成. 浙江科学技术出版社，1996

14.6 复杂性与复杂巨系统的讨论

在1986～1987年间，经过不同领域科学的讨论，SFI执行了一个较长期的计划，从事反混沌、混沌的边缘、自适应系统、免疫系统、理论免疫学、经济系统、语言进化、人工生命、人工神经网络计算、复杂动态系统等方面的工作[①]。对此，我们不可能逐项仔细的介绍，只简要地提及几个方面。

复杂系统如何在一定的规则下，产生有组织的行为，恰与混沌理论的研究内容相反(系统根据简单规则产生混沌行为)，所以称之为反混沌(antichaos)。SFI的Kauffman等又拓宽到混沌边缘(edge of chaos)的研究，认为：在各种各样的耦合系统中，最高平均适应性处于有序与混沌之间的转变过程中，通过选择一种合适的策略，生物体就会将其与环境的耦合调节到无论哪种值都会使之达到最佳配合的情况；如果生物体将这种耦合调节到适合自身的优势，那么他们将达到有序与无序的边界。SFI的科学家对经济的看法完全不同于传统的经济学家，他们把经济看成是与历史相联系的，有机且连续进化的科学。

他们认为，复杂系统是有大量的、不同的，相互作用的单元构成的网络。他们认识到还原论对处理复杂系统的局限性：

(1) 单元的行为无法独立地分析，因无法与其他单元分开。

(2) 单元间的关系或相互作用难以明确。

他们建立独特的、有关复杂性研究的学术体系，并概括总结了一套称为自动机网络(automata network，简称AN)方法。这一方法在处理一些复杂系统时是有效的。

圣塔菲研究院的一个重要观点可概括为：通过“猜想(crude looks)”看整个系统是重要的；对于复杂的、高度非线性的系统，其整体的行为不是简单地与部分行为相联系，要求有勇气、在全局情况下(whole situation)从广泛的方面看，而不是看个别方面的具体细节。上述看法出自加州理工学院基本粒子物理诺贝尔奖得主Gell-Mann。

前面我们已经介绍过“从定性到定量的综合集成”法。综合集成法的重要意义在于指导人们当遇到复杂的问题时，沿着一种科学的途径去寻求科学与经验相结合的解答。在综合集成法中，专家的猜想与直感是十分重要的。总之，可以说SFI的看法与国内的看法有相同之处：

(1) 还原论有局限性，需要有勇气从整体看问题。

(2) 在处理复杂问题时，猜想(crude looks)或直感(形象思维)具有重要性。

---

① 戴汝为，沙飞. 复杂性问题研究综述：概念及其研究方法. 自然杂志，1995，17(2)

然而，SFI 的科学家们只过分看重计算机的作用，忽略了人的作用的重要性。

1994 年 Santa Fe 举行过两次会议，一次题为“The Limits of Scientific Knowledge”。一位高级评论员 John Horgan 写了一篇报道[①]。提到会议参加者发表了颇不相同的看法，参与 SFI 工作的科学家普遍表示出这样的看法：“随着计算机性能的提高，科学将具有预测、控制与理解自然界的能力。”其他人则持异议，如 Stanford 大学的心理学家 R. Shepard 则担忧“即使我们能用计算机获得自然界的错综复杂情况，但那些模型复杂得使人难以捉摸”。经过讨论，与会者同意一位巴西数学家 Francisco Antonio Doria 的看法：“我们从复杂性到了困惑（We go from complexity to perplexity）”。从复杂性到困惑，这是美国科学家对复杂性问题进行了多年研究的感受。像社会问题或人脑问题这些开放的复杂巨系统，它们是再大的计算机和计算机网络也处理不了的问题，它可能是它们感到困惑的一个原因。另一次名为“Complexity，Metaphors，Models and Reality”的会议，对他们五年来的进展以及今后研究的问题，作了报告与讨论（anderson）。还在会上作了从八个方面研究复杂性的报告[②]。钱学森于 1997 年春节的一封信中[③]，阐述了对复杂性的研究不能脱离解决开放的复杂巨系统问题。所谓“复杂性”能泛泛讨论吗？人认识问题只能从具体事例入手，要从解决一个个开放的复杂巨系统问题开始。开放的复杂巨系统有以下几大类：

（1）社会环境、地理环境。

（2）社会问题。

（3）人体问题。

（4）人脑问题。

以毛泽东的《实践论》为指导，对每一个问题都要根据实际经验，通过具体工作，用开放的复杂巨系统方法来认识，空谈“复杂性”是无用的。将来问题解决得好，对上述四大类问题有了丰富的经验和深刻的认识，也许那时我们可以概括地讨论“复杂性”了。

Santa Fe Institute 之所以陷入困惑恐怕就在于此，我们还是要用辩证唯物主义思维指导我们的工作。

---

① Horgan. J. Scientific Americal，1995，269(6)

② Anderson，P. W. The Eightfold Way to the Theory of Complexity，In：Cowan，G. A、Pines. D、Meltzer. D. et al. Complexity，Metaphors，Models and Reality，Addison-Wesley，1994

③ 钱学森. 1997 年 2 月 8 日致于景元、戴汝为的一封信

15 系统科学及系统复杂性研究[①]

15.1 引言

近年来,国内外对于"复杂性"(complexity)研究的关注程度大有增长之势,究其原因,一方面是人们对学科交叉发展与整合的重要意义的认识越来越深;另一方面从整个科学发展所面临的挑战来看今后的发展。

复杂系统,或系统复杂性研究的范围很广,牵涉到近年来不同领域中人们关心的热点问题。关于复杂性问题的看法由于角度各异,往往出现分歧。值得注意的是,1999年4月美国《科学》(*science*)杂志出版了"复杂系统"的专辑。两位编者Richard Gallagher和Tim Appenzeller在其以"超越还原论"为标题的导言中,对他们所指的"复杂系统"作了如下简单描述:通过对一个系统的分量部分(子系统)性能的了解,不能对系统的性能作出完全的解释,这样的系统称为"复杂系统"。用通俗一点的说法,对于复杂系统,整体的性质不等于部分性能的和,即系统整体与部分之间的关系不是一种线性关系。这一说法虽然很简单,但在科学的方法论方面却引起了人们的注意与反思,也就是处理与解决复杂系统有关问题,几百年来科技界所用的还原论方法论有所不足,还需要新的方法[②]。"复杂系统"这一专辑的编者针对容易出现的问题,把握住两点:① 有意避开学术术语的雷区;美国学者在学术术语方面喜欢"创新",有位美国学者曾有这样的表达:宁愿用别人用过的牙刷,也不愿用别人用过的术语。从而可见其特点,对传统的先建立严格定义再进一步进行方法与体系的研究的做法敬而远之。对于复杂性研究这类还处于萌芽状态的科学领域,一开始就建立严格的定义,对敞开思想、有所创新不见得有积极的作用。② 尽量避开一个名词究竟表达什么含义(即语义)的争论,大部分人对这种争论的效果不佳往往都有所体会。两位编者从复杂性研究的主流出发,经过精心安排,邀请了物理、化学、生物、经济、生态、地理环境、气象、神经科学等方面的科学家撰写他们所从事的领域中,关于复杂系统的研究进展;为了对各领域所作的贡献不加以人为的约束,对被邀请撰稿的专家来说,研究性的含义指的是他们在本学科中所确定的含义,并不强求

① 戴汝为.系统科学及系统复杂性研究.系统仿真学报,2002,14(1)

② 戴汝为主编.复杂性研究文集.中科院自动化所复杂系统与智能科学实验室,1999

为大家所认可；并简短地给出所说的复杂性概念在他们从事的领域中到目前为止所起到的影响；预测如何能推动今后的发展方向，并讨论在一个领域内的发展，能否移植到其他领域。

大家知道，目前国内外对复杂系统的研究，对学科交叉发展，不同学科的融合重要的意义有进一步的了解；但从实际出发，当前人们面临着必须处理与解决的种种复杂问题；如全球经济的可持续发展，生态环境保护及区域规划等。在这种类型的系统中，与以往的工程系统的明显不同之处是往往大量活的、有生命的物体，如动物和人作为系统中的部分(子系统)。这些子系统相互之间有强烈的交互作用，这样的系统称为"开放的复杂巨系统(open complex giant system)"。这类系统及其处理的方法是我国科学家钱学森于20世纪80年代末，针对一些复杂的系统所概括和提炼出来的。复杂巨系统包括的子系统很多，成千上万甚至上亿万，它的性质可以概括如下：① 开放性：系统本身及其子系统与周围的环境有物质的交换、能量的交换和信息的转换。② 复杂性：系统中子系统的种类繁多，子系统之间有交互作用。③ 层次性：已经认识得比较清楚的子系统到可以宏观观测的整个系统之间层次很多，甚至有几个层次也不清楚。很明显，开放的复杂巨系统超出了还原论的范畴。以知识渊博著称、"对两弹一星"作出重大贡献的钱学森对复杂性的看法是：复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特性。他在1990年8月14日发表于《人民日报》题目为"要从整体上考虑并解决问题"的文章中明确提出"我们现在要重视复杂性的问题。而且我们要看到解决这些问题，科学技术就将会有一个很大的发展。我们要跳出从几个世纪以前开始的一些科学研究方法的局限性。我们既反对唯心主义，也反对机械唯物论。我们是辩证唯物主义者。在这方面我们是居于优势，千万不要妄自菲薄"。

15.2　系统科学在中国的进展

前面所谈到的复杂性，可以说主要是谈的系统复杂性。这与系统科学有密切的联系。关于系统科学，这里引用德国著名系统科学家哈肯(H. Haken)的两段话。他在许国志主编的《系统科学大辞典》的序言中写到："系统科学的概念是由中国学者较早提出的。我认为这是很有意义的概括，并在理解和解释现代科学，推动其发展是十分重要的"。又写到："中国是充分认识到系统科学巨大重要性的国家之一"。2001年，钱学森的专著《创建系统学》一书[①]，在国内出版，通过这本书使人们可以对系统科学在我国的发展以及国外专家对这方面的评价，有一个比较清晰的了解。

---

① 钱学森. 创建系统学. 山西科学技术出版社，2001

下面先谈谈钱学森从整体考虑，经多年的思考提出的现代科学技术体系[①]。这个体系从纵向分为三大层：最高层是马克思主义哲学。马克思主义哲学、辩证唯物主义是人类一切知识的最高概括。中间层是从智慧形成的角度，以“性智”与“量智”来概括各科技部门及文艺活动与美学对人类的“性智”与“量智”两种类型智慧的形成与影响。最下面一层是现代科学技术十一大部门，即自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、地理科学、军事科学、行为科学、建筑科学以及文艺理论与文艺创作；并分别通过 11 座“桥梁”：自然辩证法、唯物史观、数学哲学、系统论、认识论、人天观、地理哲学、军事哲学、人学、建筑哲学和美学，把马克思主义哲学与十一大科技部门联在一起。

现代科学技术体系是钱学森从整体上加以考虑提出来的，在每一大部门中，又分为“基础理论”、“技术科学”及“应用技术”三个层次。在十一大部门之外，还有未形成科学体系的实际经验的知识库，以及广泛、大量成文或不成文的实际感受，如局部的经验、专家的判断、行家的手艺等等也都是人类对世界认识的珍宝，不可忽视，亦应逐步纳入体系。总之，这一分类法显示出这十一大部门之间本来就有的互相联系、互相促进、不可分割的关系，并揭示了马克思主义哲学与各门具体科学技术必然地、紧密地熔铸一起的内在关系，形成统一完整的现代科学技术体系。以上所述的现代科学技术体系是他近些年来心血与智慧的结晶，充分体现出他的“集大成”的智慧。

钱学森在逐渐形成他对现代科学体系结构的过程中，还对一些新兴的科学技术部门如系统科学、思维科学、人体科学等科学技术部门进行了研讨。对于系统科学的体系，他作了如下阐述：系统科学的应用技术就是系统工程、自动控制等；技术科学层次的是运筹学、控制论、信息论；基础理论是系统学。系统科学到马克思主义哲学的桥梁是系统论。下面分别介绍他对系统工程、工程控制论及系统学的开创性工作。按照历史发展的先后顺序，我们先从工程控制论谈起。

15.2.1 工程控制论[②]

相对论、量子论以及控制论被人们认为是 20 世纪上半叶的三项重大科学伟绩。1948 年美国科学家 N. Wiener(维纳)发表了专著《控制论》一书，其英文书名是《Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine》。经后人研究，1935 年维纳在清华大学做了一年的访问教授，所以有一种说法：控制论的思想起源于清华大学。

---

① 王大中，杨叔子主编. 技术科学发展与展望. 现代科学技术的特点和体系结构(钱学森). 山东教育出版社，2002

② 钱学森. 工程控制论. 戴汝为，何善堉译. 北京：科学出版社，1958

《控制论》发表的时候，钱学森在美国，已经是著名的力学家。他亲身参与了美国应用力学的发展，经历了流体力学作为一门技术科学，怎样从水利工程师、气象工程师、空气动力工程师以及其他领域工程师们的工程技术实践中加以总结提高，从而分离出来的过程。由于有了流体力学提供的理论与方法。上述领域的工程师们才能在他们日常的工程技术实践中分离流体力学研究成果。至少可以说，如果没有流体力学提供的理论与方法，肯定会对超声速流动的了解与利用大为延迟。站在这样的科学思想和方法论高度，钱学森在20世纪40年代末、50年代初对第二次世界大战后迅速发展的控制系统与制导工程技术实践进行全面观察时，基于他在火箭技术方面的丰富经验，迅速认识到维纳所创立的控制论的重要性，并很快运用控制论的原理解决了一批喷气技术中的问题。诸如，火箭喷管的传递函数、远程火箭的自动导航、火箭发动机燃烧的伺服稳定以及火箭制导系统的噪声过滤问题等。他以敏锐的眼光去发现、提炼出指导控制与制导系统设计的普遍性概念、原理、理论和方法，从而创建了作为一门技术科学的工程控制论。他首先于1953年底在美国加州理工学院开设了“工程控制论”的课程，接着于1954年在美国出版了《Engineering Cybernetics（工程控制论）》一书。该书中，除了一些控制系统的基本原理与数学工具外，书的中心部分都是由钱学森结合火箭技术的研究成果组成。该书把一般性、概括性的理论和实际工程经验很好地结合起来，对工程技术、各个系统的自动控制和自动调节理论作一个全面的探讨。它一方面奠定了工程控制论这门技术科学的理论基础，另一方面指出这门新学科今后的几个新方向。1955年他冲破重重阻碍返回祖国。在回国前夕，他带着妻子和幼小的儿女向他的恩师 von Karman（冯. 卡门）告别时，手里拿着一本刚出版的《工程控制论》以及他自己写的讲物理力学的讲义送到老师手里。当时年已74岁的力学大师冯·卡门看了看，很有感慨地对他说：“你现在在学术上已经超过了我”。钱学森听了老师的话，激动极了，心想我20年奋斗的目标，现在终于实现了。我钱学森在学术上超过了这么一位世界闻名的大权威，为中国人争了气。

值得一提的是2000年国际著名的自动控制理论专家 Astrom 在他刚出版的一本新书中，一开始就引用了《工程控制论》“序言”中的一段话：“这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素，可在其他各门自然科学中这些因素都是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质以及整个系统的总的运动状态。”如果我们着眼于物理世界三个要素的分析：物质、能量和信息，那么控制论只研究信息与控制，它不讨论能量和物质。由此可以看出钱学森早在1955年已经把研究的“着眼点”转到“信息与控制”方面了。后来，他倡导了以信息处理为核心的思维科学的研究，提出智能计算机是尖端技术的观点，看来早就有了思想准备。

15.2.2 系统工程

早在1963年,钱学森在参加第二个科学规划时,就提出要搞系统工程。在他主持国防部五院工作时就建立了总体设计部。这个部门的工作实际上就是航天系统工程。据系统工程专家许国志提供的历史事实:钱学森在美国期间,有相当长一段时间是在加州理工学院的喷气推进实验室(JPL)工作(JPL是美国导航航天技术的摇篮)。他曾经是这个实验室的第一任主任兼哥达德(Goddard)讲座教授。第二任讲座教授也是后来成为JPL主任的匹克林(Pigkling),这位教授在20世纪60年代写过一篇文章,关于JPL系统工程发展史方面的记载,提到该实验室从事系统工程工作的历程。其发源正是钱学森担任该实验室主任的时期。

1978年钱学森和许国志、王寿云在《文汇报》上发表了"组织管理的技术——系统工程";该文阐述了系统工程的内容、理论基础及有关的学科:"系统工程"是组织管理"系统"的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,是一种对所有的"系统"都具有普遍意义的科学方法。系统工程是一个总类名称。因体系性质不同,还可以再分,如打仗的组织指挥叫军事系统工程,国家机关的行政办公叫行政系统工程等。系统工程的数学基础除了一般谈到的数学基础之外,还有统计数学、概率论。控制论,包括大系统理论也是系统工程的基础,总之可以说系统工程的建立是由于现代大规模工农业生产和复杂的科学技术体系的需要,以及电子计算机的出现才促成的。系统工程居系统科学的应用技术层次,对我国的经济建设与国防建设具有十分重要的作用。1982年湖南科学技术出版社出版了钱学森等《论系统工程》一书。后来经过大家的努力,系统工程的应用普遍地开展起来。现在许多人,包括一些领导同志,脱口而出的一个名词就是系统工程,媒体上更是经常出现。

钱学森通过自己在"两弹一星"等工程的实践,在1981年夏到1982年10月,提出把博弈论和系统科学结合起来用于结构复杂、成员众多的对阵集团。他在指导已故的王寿云(原国防科工委科技委副主任)编著《现代作战模拟》一书的讨论中,从兰彻斯特(F. W. Lanchester)和奥谢波夫(M. Ospov)的工作中,提炼出半经验、半理论的处理复杂对阵问题的方法论,并在后来的工作中赋予这一方法论更广泛的涵义,概括为处理复杂行为系统的定量方法。这种方法是半经验、半理论的。提出经验性假设(猜想或判断),是建立复杂行为系统数学模型的出发点。这些经验性假设不能用严谨的科学方式证明,但需要用经验性数据对其确实性进行检测。从经验性假设(猜想或判断)出发,通过定量方法途径获得的结论,依然具有半经验、半理论的属性。当人们寻求用定量方法处理复杂系统时,容易注意数学模型的逻辑处理,而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道,这样的数学模型看来"理论性"很强,其实不免牵强附会,从而脱离真实情况。与其如此,反不如从建模一开始就老老实实承认理论的不足,而求援于经验性判断,让定性的方法与定量的方法结合起来,最

后定量。这样的系统建模方法是建模者判断力的增强与扩充。

15.2.3　系统学

钱学森认为他对系统学的认识始于1955年，当时他返回祖国与许国志在同一条船上，共同谈起运筹学问题，两位科学家有许多共同的认识，都感到这个问题是对新中国的社会主义建设会有很大帮助。回国后在科学院力学所成立了运筹学研究室，许国志任主任，研究工作就是从那个时候开始的。可以说系统学是从运筹学发展而来的。

2001年在钱学森90华诞到来的时候，山西科学技术出版社出版了他的著作《创建系统学》一书。这本书集中反映了他于20世纪80年代通过讨论班的方式致力于"基础理论"层次的研究，创建系统学的工作；经过大家10多年的努力悟到开放的复杂巨系统这个概念。这个概念已经成为整个系统科学的核心概念。该书由三部分组成：一是在系统学讨论班及有关建立系统学的一些精彩的讲话。讨论班经常请有关的专家作报告，讲完某个具体问题并讨论后，钱学森总有一段即席发言，阐述自己的看法；二是他在这段时期所发表的一些学术论文，其中的"一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论"，以及"再谈开放的复杂巨系统"，既是原始创新，又对今后如何研究开放的复杂巨系统问题指出了明确的方向，也就是说对于复杂巨系统的研究，应该从实际出发，从一个一个具体的复杂巨系统去加以研究，从解决国家经济发展中遇到的问题与国防需要的问题出发进行研究，这些文章被誉为系统科学发展的又一个里程碑；三是他和国内一些学者就系统科学有关问题的通信。钱学森对于发扬科学民主的重要性极为重视。他这位国内外享有盛名的人给别人写信时，都是自己亲自动手，写完信后，复制留底，把原件寄给收信人。这种亲自动手，在讨论问题时平等待人，是非分明，明确阐明自己学术观点的做法，给收信人留下深刻的印象，并起鼓舞的作用。

《创建系统学》的特色之一是提炼出开放的复杂巨系统及处理与解决有关开放的复杂巨系统问题的方法论：从定性到定量的综合集成法。这一方法论强调了在解决复杂问题时，要发挥人的"性智"以及计算机的高性能，把两者结合起来，这样，才能从宏观整体上看待与要考虑的问题，又能从微观上给以处理，用计算机来加以操作与实现。我们可以认为，综合集成是人用计算机的软硬件来综合专家群体定性认识及大量专家系统所提供的结论及各种数据与信息，经过加工处理从而使之上升为对总体的定量的认识。综合集成的过程是相当复杂的，即使掌握了大量的定性认识，也不是通过几个步骤、几次处理就能达到对全局的定量认识。因为复杂的、智能型的问题往往表现为结构不良的问题(ill structured problem)，也就是说目标、任务范围、计算机允许的操作都不具有明确的意义，需要一种有反馈的过程来加以解放。结构不良的另一种含义是针对被解决的问题而言的，即所具有的知识是不完备或不

一致的。例如对于同一个问题,两个专家的看法可能完全不同,发生了矛盾,这就必须靠人参与解决。另一方面当然也要发挥计算机快速处理的本领,形成人机结合的智能系统。该书的另一特色是在创建系统科学的过程中,作者十分关注与体现了学科的交叉与融合,最为明显的是系统科学与思维科学的融合。从现代科学技术体系结构来看,思维科学的理论基础是思维学与信息学;应用技术层次包括人工智能、计算机软件工程、情报资料库技术、文字学、密码技术等。后面两个层次的工作与信息技术有着十分密切的关系。在前面介绍工程控制论时,已经谈到过,作者的观点开始从现代力学转向信息与控制方面了。前面所说的综合集成法及其应用,是以当代信息技术为依托,例如从 Internet 上获取海量信息,利用知识工程的结果,把人的"心智"与计算机的高性能相结合,都与信息技术紧密相关。这方面钱学森讲得很清楚,从定性到定量的综合集成法实际是:① 综合集成定性认识达到对整体的定量认识。② "法"即技术工程,是综合集成工程。③ 综合集成工程居思维科学的应用技术层次,创立并发展它将为思维科学的技术科学层次及基础科学层次(思维学)提供营养。由此可看出,从系统科学角度来看,开放的复杂巨系统与从定性到定量的综合集成法是系统学中的核心部分;从思维科学来看,综合集成工程(后来称为大成智慧工程)是思维科学的一项应用技术。

综上所述,钱学森在 1955 年回国后,从 1978 年倡导开展系统工程,发表了"组织管理的技术——系统工程"的文章开始,接着又在北京领导和组织了系统科学与思维科学两个讨论班。发表了许多有关这两门科学的开创性文章,并于 1990 年发表了"一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论"的文章,总结和提炼出开放的复杂巨系统,以及处理这类系统的方法论,即从定性到定量的综合集成法,开辟了大成智慧工程领域;对于这个领域,实际是体现了系统科学与思维科学的许多构思的交叉与融合。

15.3 控制系统与知识系统的发展

有关系统的研究是从简单到复杂。在现实的生产活动中,所面临的控制问题十分复杂,有的包含着多种物理与化学的过程,有的控制对象具有不确定性而且会发生突变等。复杂系统的控制问题已经提到人们的面前。随着信息技术与高、新技术的发展及计算机的推广应用,在国民经济发展与国防建设中涉及全局性影响的系统往往朝着大型化和复杂化发展。关于什么是复杂系统,科技界有各式各样的说法。我们认为具有复杂行为的系统,表现在系统的部件之间,或子系统之间有着很强的耦合作用,具有难以线性化的非线性性质,所以会出现极限环甚至混沌现象。另外,系统具有高度的不确定性,要求具有实时性,而且难以用传统的方法来建立系统的数学模型。许多工业生产过程就是这种复杂系统的典型例子。还有,被控制对象本

身虽然不复杂，但是对这种对象加以控制后所形成的系统是在复杂的环境之中运行的，由于环境的复杂而导致在这一环境中能够有效运行的系统也必然是复杂的。典型的例子是研制能为家庭生活服务的机器人。一个家庭这样的环境是很不规整的，因此家用机器人的控制也成为复杂系统的控制问题。这类问题用传统的控制理论与方法很难奏效。经过较长时期的孕育与发展，国内外已认识到把人工智能的原理与方法及人的经验与智能用于复杂系统的控制是解决复杂系统控制的主要途径，并开展了许多有意义的工作。例如在不了解对象动态特性的情况下，“用模糊控制”对倒摆的控制就是一个成功的例子。这可以认为是发展的第二个阶段，这个阶段特点是把人的知识与经验直接注入到控制系统中去。

与上述控制科学技术发展时代平行，我们要审视人们使用计算机模仿人的智能，即人工智能，它也在演变。从科学的发展来看，20 世纪 40 年代初在第二次世界大战对科学技术的要求与影响下，计算机科学、控制论、人工智能等蓬勃发展起来，机器智能研究的兴起可以说是这个时期的产物。在人工智能(AI)研究方面，Turing 被后人尊为人工智能思想的奠基人；他的贡献在于对机器智能的描述，提出把基于离散量的递归函数作为智能描述的基础。另外，他提出了著名的“Turing”实验，给出了测试机器是否具有智能的基于行为主义的标准。早期的研究在用计算机证明数学定理，研制出具有学习功能的跳棋程序，把人工智能的研究结果用于解决困难的数学问题等方面取得了一些成就。这些成就使人备受鼓舞，以至于对人工智能的发展作了过分乐观的估计。1958 年有的人工智能专家充满自信地预计：用不了 10 年，计算机将要成为世界象棋冠军；……用不了 10 年，计算机将可以谱写出达到优秀作曲家水平的乐曲；……然而人工智能研究的实践所给出的回答使人们的头脑冷静下来。实际的情况是从 20 世纪 60 年代到 70 年代，人工智能取得的成果远远达不到专家们的美好期望。但是在缓慢的进程中也取得了一些成果。其中，知识工程所取得的成就最使人工智能研究引以自豪。知识工程与通常人们所说的构建专家咨询系统，即以专家水平进行论断与咨询的计算机软件，只是说法的不同。知识工程的历史是以 1969 年美国著名的知识工程专家 Feigenbaum 公布第一个专家系统 DENDRAL 开始的，进而他在 1977 年的国际人工智能联合会议上综合与阐述了许多 AI 科技人员对 AI 研究的新起点，大体概括为：知识工程师所实践的技术是把人工智能研究中产生的原理和工具用到需要专家知识解决的那些应用难题上。获取知识，表达知识，并适当地应用知识来构造和说明推理路线等技术问题，是知识库系统设计中的一些重要问题。构造智能媒介这种技术是程序设计技术的一部分，也是它的扩充，用大量的知识来表达和推理也是制造复杂的计算机程序的技术；即改变了以往人们普遍认为几个推理定律再加上强大的计算机就会发生专家和超人的性能这一起主导作用的信念，人们认识到用以往所遵循的“通用的求解策略”这一能力有限的方法来解决很复杂的问题实在是难以达到目的，需要转向狭隘的应用问题。

专家系统就是研究利用针对某个专门问题的专家知识建立人机系统的方法和技术来进行问题求解。专家的能力涉及专家两个方面的知识，即公开的知识和个人所掌握的经验性的知识。公开的知识包括事实和专业中的理论等，这种知识往往记录在教科书和参考书中；专家所掌握的知识指的是专家通过实践获得的经验知识，称为启发式(heuristic)知识。这种知识是专家区别于非专家的标志所在，能使专家在必要时作出经验性的判断，辨别哪些途径是有希望的解决途径，并能有效地处理错误或不完全的数据。可以说专家经验性的知识是专家能力的关键所在，专家系统或知识系统的威力是从它所处理的知识中产生的。由于科技人员把着重点放在解决狭隘定义的应用问题，并且研制开发了大量的、各式各样的专家系统和决策系统。在国内，这门工程技术近 10 年才发展起来，并取得了较大进展。

我们花了不少篇幅讨论控制系统及知识系统的发展，这两种不同类型的系统是分别从不同的领域中逐渐发展和成熟起来的，两者的特点大不相同。在我国，人们正在致力于发展的第三个阶段，解决复杂系统的控制。钱学森等把系统的研究拓广到开放复杂巨系统的范畴。他们对各式各样的系统进行分类，并分析所遇到的各种系统；概言之，不外乎自然系统以及人所制造出来的人工系统两大类。再进一步，根据组成系统的子系统种类的多少和它们之间的关联关系的复杂程度又可以把自然系统和人工系统的种类再分为简单系统及巨系统两类，即：

(1) 简单系统。组成系统的子系统数量比较少，子系统之间的关系比较单纯，例如，一个温度控制系统就是一个人工简单系统。

(2) 巨系统。组成系统的子系统数量非常大、成亿、上百亿、千亿。如果系统中子系统的种类不太多，而且它们之间的关联关系又比较简单，则称为简单巨系统；如果子系统的种类很多，并且有层次结构，子系统之间的关系又很复杂，就称为复杂巨系统；如果系统又是开放的，开放是指系统与系统中的子系统分别与外界有各种信息交换，系统中的各子系统能够通过与周围环境的交互作用增加适应的能力，这种系统就称为开放复杂巨系统。例如生物体系统、人脑系统等。大多数的人造系统都是简单系统，如一般的控制系统或信息系统，而且不具有开放性。就是自动化工厂也不过是人工的大系统而已。至于开放的复杂巨系统，这种系统无论在结构、功能、行为方面都很复杂，以至于到今天它的大多数性能我们还不清楚。对于开放复杂巨系统的研究，钱学森提出处理这种系统的方法是“从定性到定量的综合集成(meta-synthesis)”。这不仅为开放复杂巨系统的研究，而且为智能系统的研究打下基础，为把群体专家的知识经验注入系统中提供了手段。

总之，可以概括出如下的看法：

(1) 早期简单系统的发展阶段可概括为以“控制论”为标志，而复杂的系统，体现把专家的知识经验注入系统中的阶段，可概括为以“人工智能”为标志。

(2) 今后系统的发展将是在系统中体现出群体专家知识经验的新时代，其标志

是人机结合的大成智慧。

从学科的发展考虑，系统科学与智能科学的研究互相借鉴，找到一个共同点，把两者加以沟通也是势在必行，有利于开拓新的科学领域。

15.4 “系统复杂性”的研究

从控制系统或者智能系统上升到研究系统的复杂性是很自然的事。关于复杂性(complexity)的研究，在很早的时候就已经开始了，但用的名字不是“复杂性”而已。人工智能与认知心理学研究的先驱、中科院外籍院士、诺贝尔经济学奖获得者司马贺(H. A. Simon)早在1956年，宣告人工智能(artificial intelligence)诞生的Dartmouth会议上，曾经提出对这一新兴的学科赋以“复杂信息处理”的名字①，但最终J. McCarthy说服大多数人，接受“人工智能”的名称。后来，1969年司马贺的专著《人工科学》首次出版。1982年该书出版了第二版，由武夷山翻译成中文。该书的最后一章题目为“复杂性的构造(the architecture of complexity)”，作者谈到：在科学和工程中，对系统的研究的活动越来越受到欢迎。它受欢迎的原因，与其说是适应了处理复杂性的知识体系与技术体系的任何大发展的需要，还不如说是它适应了对复杂性进行综合和分析的迫切需要。该书于1996年第三版问世时，作者把原来书中最后的第七章改为第八章，新增了题为“对复杂性的各种看法”一章作为第七章。由此可以看出作者对复杂性研究的关注。司马贺还从科学技术发展的角度对近年来与复杂性密切有关的内容作了扼要的概括：第一次世界大战后，爆发了早期的研究，所用的题目是：整体论(holism)，经验的整体(gestalts，格式塔)，创造性进化(creative evolution)；在第二次世界大战后所出现的题目是：信息(information)，控制论(cybernetics)，一般系统(general systems)；当前爆发出的题目是：混沌(chaos)，自适应系统(adaptive systems)，遗传算法(genetic algorithms)以及元胞自动机(cellular automata)。“系统与复杂性”的研究密切相关的若干课题可归纳如下：

(1) 整体论和还原论(holism and reductionism)

(2) 控制论与一般系统论(cybernetics and general system theory)

(3) 复杂性方面当前的兴趣(current interest in complexity)

(4) 复杂性与混沌(complexity and chaos)

(5) 在突变和混沌世界中的合理性(rationality in a catastrophic or chaotic world)

(6) 复杂性与进化(complexity and evolution)

---

① D. Crevien. AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence, Basicbooks, 1993

(7) 遗传算法(genetic algorithms)

(8) 元胞自动机和生命游戏(cellular automata and the game of life)

以上是1996年司马贺所作的归纳。由于复杂性研究在迅速发展,目前人工生命、生物信息学等已成为这一新兴领域中的重要组成部分。国际人工生命(artificial life)会议于2000年8月在美国俄勒冈州的波特兰举行第七届会议就是一个例子。关于什么是复杂性?这位知识广博被誉为"杂家"的司马贺(H. Simon)的看法是:复杂性是我们生活的世界,以及与其共栖的系统的关键特征。而我国科学家钱学森认为:复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特性。两位的观点颇有相似之处。

16 Internet——一个开放的复杂巨系统[①]

Internet 在国际上正被作为大规模系统的典型实例加以研究。从系统科学的角度，可以认为 Internet 是一个典型的、具体的开放的复杂巨系统实例；分析清楚这个系统，对于人们更具体地分析、研究与 Internet 有关的问题，研究和处理开放的复杂巨系统问题，提供了可供借鉴的途径。

16.1 开放的复杂巨系统的特性概述

钱学森[②]等首次向世人公布"开放的复杂巨系统(open complex giant systems)"这一科学的新领域及其基本观点后，学者们对人脑系统、人体系统、地理系统(包括生态系统)、社会系统等进行了研究，认为它们无论在结构、功能、行为和演化方面都很复杂，都是开放的复杂巨系统[③④]。

开放的复杂巨系统具有以下特性[⑤]：

(1) 系统与外部环境，以及子系统之间存在能量、信息或物质的交换。就系统与环境的关系而言，开放表现为最复杂与常见的不可访问性的、不确定的、动态连续的环境类型。

(2) 从已经认识的比较清楚的子系统到可以宏观观测的整个系统之间层次很多，甚至有几个层次也不清楚；系统子系统或者组件的组成模式多种多样，有的甚至不清楚具体模式，或是一些基本模式的组合或变异体。

(3) 系统是由时空交叠或分布的组件构成的；肩负不同角色的组件间通过多种交互模式、按局部或者全局的行为法则(如社会理性原则等)平等交互，涌现出宏观与整体形态。

---

① 戴汝为，操龙兵. Internet——一个开放的复杂巨系统. 中国科学(E辑)，2003，33(4)

② 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，13(1)

③ Barabasi，A. L，Albert，R. Emergence of Scaling in Random Networks，Science. 1999，286

④ 王寿云，于景元，戴汝为，汪成为，钱学敏，涂元季. 开放的复杂巨系统. 浙江科学技术出版社，1996

⑤ 戴汝为，王珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报，1993，19(6)

（4）系统的组成、组件类型与状态、组件之间的交互，以及系统行为随时间不断改变；系统中子系统或基本单元之间的局部交互，经过一定的生命周期之后在整体上演化出一些独特的、新的性质，形成某些模式。

（5）系统中基本单元或子系统的数目极其巨大，从成千上万甚至到数以亿计。

此外，许多开放的复杂巨系统，如与社会有关的巨型系统，还表现出人机共存(human-computer coexisted)的特点：在系统体系中存在人这个高级智能组件，人既是系统的组件，也是系统演化发展的关键因素；求解问题的复杂性不能仅靠机器处理，需要发挥人及其群体的常识知识与创造性。

开放的复杂巨系统理论刚诞生时并没为广大的科技界所认识。此后，经过两次香山科学会议中来自各个领域的专家学者就多个领域进行了报告和相关的讨论，使大家对开放的复杂巨系统及其方法论有了进一步的理解和更深的认识。近些年来，关于开放的复杂巨系统的研究又有了较大的发展，这一理论及其方法论被纳入学科前沿，并且以宏观经济决策系统作为开放的复杂巨系统的具体事例，设立了国家自然科学基金重大项目“支持宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究”，围绕这个项目正在进行大量的研究与综合集成体系支撑环境雏形系统设计工作。

钱学森谈到，人认识问题只能从具体事例入手，要从解决一个个开放的复杂巨系统问题开始①。对于确定要研究的开放的复杂巨系统，越接近人们的日常活动，与人的关系越密切，系统结构、行为、功能、演化越易于为人理解的系统，分析解决起来越容易为人所接受，这样的系统的研究对于促进人们对开放的复杂巨系统及其方法论的认识，推进开放的复杂巨系统的研究具有促进和示范作用。

16.2 以开放的复杂巨系统的观点探讨 Internet

Internet 是一个极其复杂的网络系统：只有从系统学的角度，才有可能认识和分析清其本质。

16.2.1 Internet 系统结构

从工程技术的角度看，可以认为 Internet 是由以下要素组成的一个五元变量组：

Internet＝{{人、组织、机构}，{主机系统}，{互联设备、协议}，{介质}，{信息资源}}

这种结构分析方法突出了物理特点（如图 16-1），不利于从整体上把握 Internet 系统的本质。从系统学的角度，有必要尽量避免其技术细节，而抽取 Internet 中的

① 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统. 模式识别与人工智能，1991，4(1)

主要因素加以研究。Internet 为用户提供的绝大部分的信息交互是通过 WWW 方式实现。因此，从分析万维网入手，可以掌握 Internet 系统的本质。这就是本文阐述 Internet 为开放的复杂巨系统的出发点，而不打算从物理角度讨论其技术和实现环节。

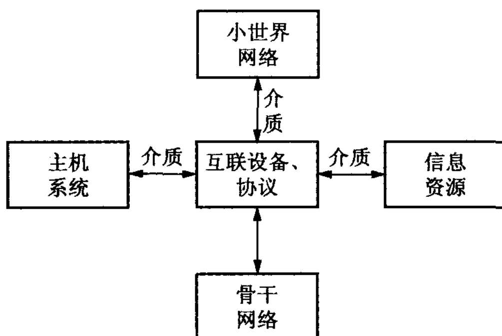


图 16-1　Internet 系统物理特点

Internet 作为一个大规模的复杂系统，这里参照专为研究复杂系统而兴起的多智能体系统中的术语①加以描述。Internet 系统的组成可以抽象为一个由维度(dimension)：物理维(physical)、自我维(self)、社会维(social)与关系维(relational)组成的四维模型(见表 16-1 所列)。

表 16-1　Internet 系统的四维模型

物理维	主机、超链接、站点
自我维	人、组织、机构
社会维	社会政治、经济、意识形态
关系维	控制型、对等型、依存型、所有型

就物理维而言，构成万维网的基本单元是节点所在的主机系统；节点之间通过超链接机制互联。于是 WWW 就可以看作由主机系统和超链接组成的集合体，各主机系统之间通过超文本文档中的超链接联系起来。Internet 系统的组成环境包括自我维与社会维两个层次：自我维表现为 Internet 系统的微观角度，包括用户或组织、机构甚至国家或地区；社会维指社会系统的宏观层次，Internet 构成并变革着社会经济系统、社会政治系统、社会意识系统。Internet 组件之间表现出控制、对等等多种关联与交互关系。

对 Internet 的拓扑结构的研究表明，由于新的网页(节点)不断增加，并与系统

① Ferber. J. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence, Boston: Addision-Wesley, 1999

的本质与组成无关[1]；以及新网页不断连接到已经拥有大量连接的网页之上；一个网页连接到其他 K 个网页上的概率呈幂律分布 $P(k):k^{r}$[2]，而使 Internet 的拓扑结构表现出常见随机网络所罕见的尺度无关(scale-free)特性[3~5]。

16.2.2 WWW 自组织机制

万维网 WWW 通过超文本文档组织信息。超文本是包含由一些词、短语、句子或小图片等作为超链接的指针的复合、非顺序、相互关联、具有非线性结构的文档，为用户提供树状纵深型的相关主题的关联与联想，符合人类思维方式与学习环境。用户按键盘或点击鼠标可以进行横向或纵向相关资源的指针串的定位，通过浏览器在本地激活目标信息。由超链接指针串向纵深连接下去，就组成一个动态的非线性链表；而众多超链接指针串的纵横深入就形成了难以计数的、动态变化的、彼此交融的信息链网，这样就把 Internet 上看似孤立、杂乱的所有超文本信息组织在一起，构成一张巨大的、遍及全球的动态互联网络。

虽然这些信息链深度不一，主次难辨，也无法区分起止点。但是，当就某一主题在 Internet 上搜索与之相关的网页时，一些网页或所在的节点中的服务(具有关于本主题的内容较全面、更新较快、连接畅通性好等特点)是被访问次数最多的网页(或节点)之一，成为该主题的权威网页(或节点)；另一些则是访问各信息链时经过次数最多的网页(或节点)，为中心网页(或节点)(这些网页具有指向权威网页的热链接或链接目录列表)。Internet 上的这些权威或中心网页以更高的概率连接到其他网页上，并进而自组织出现网页本地聚集效应[6]。这些实时演变的取集群体构成了 Internet 的子系统，子系统千姿百态、数量巨大，子系统之间彼此交融、动态转换，这个网络极强的自组织能力使其形成一个极为复杂却与尺度无关的人工演化网络[7]。

Internet超链接的分布规律表明，WWW通过这种超链接的信息存储组织结构

---

① Barabasi, A. L, Albert. R. Emergence of Scaling in Random Networks, Science, 1999, 286

② Barabasi, A. L, Albert. R. Emergence of Scaling in Random Networks, Science, 1999, 286

③ Barabasi, A. L, Albert. R. Emergence of Scaling in Random Networks, Science, 1999, 286

④ Albert. R, Barabasi, A. L, Jeong. H. et al. Power-Law Distribution of the World Wide Web, Science, 2000, 287

⑤ Albert. R, Barabasi, A. L. Topology of Evolving Networks: Local Events and Universality, Physical Review Letters, 2000, 85

⑥ Albert. R, Barabasi, A. L. Topology of Evolving Networks: Local Events and Universality, Physical Review Letters, 2000, 85

⑦ Albert. R, Barabasi, A. L, Jeong. H. The Internet's Achilles Heel: Error and Attack Tolerance of Complex Networks, Nature, 2000, 406

极大地加强了信息的组织和搜索能力(Google 搜索引擎充分利用 WWW 自组织机制而获得巨大成功),形成乱中有序、动态中的相对稳定。

16.2.3　Internet 系统动力学特性

Internet 是一个综合了链接网络的无论何时、何地、何人、何种形式、何种内容的信息,以不确定性的形式,不确定性的时间进行着不确定内容的动态交互作用形成的动态系统。这个系统完全具备了开放的复杂巨系统的动力学特性:

(1) 开放性。构成 Internet 的主机之间、网页之间通过超文本、联接协议实现信息、数据与知识的实时增减、共享、搜索、传递或转移,对 Internet 而言,人既是用户,又是它的缔造者。在全球客户不稳定、长期的、动态连接的自发努力下,Internet 的社会形态和智能逐步实现,人们在接入 Internet 获取大量知识、信息和服务的同时,还从中获得灵感、他人的经验与智慧,发展自己的知识、思维和能力,形成 Internet 自我与社会层上的趋同与本地聚集效应;并进而作用与改变着社会政治、经济、文化和意识形态。Internet 已经成为作用人类发展和进步的源泉和动力之一、影响国家安全与发展战略的重要因素。可见,Internet 的形成与发展、智能的涌现是开放与交互的结果。

(2) 层次性。Internet 是由分布于世界上的难以计数个子网互联而成的,这些子网时大时小,拓扑结构灵活多样,所处的层次时深时浅,运行环境千姿百态,接入方式繁杂多变。就某个指定的网络而言,在 Internet 上具有所处层次的动态不确定性、链接模式的多样性和路由的动态随机性;但就 Internet 的拓扑结构而论,却是自组织而成的尺度无关的演化形态[①~③]。构成 Internet 的主机、网络在这样复杂多样、层次交叠、动态多变中,进行信息、数据、服务之间的交互、转移、生灭,形成了 Internet 系统的动态、连续、不确定的系统状态。

从环境要素看,由人主导的与 Internet 密切相关的社会经济、政治和意识系统,因网络所在国家或地区的文明多样性,通过 Internet 交汇在一起,彼此冲击与作用,在碰撞中吸纳与演变,演化出本源与趋同等多种形态。从微观角度看,因个人或组织所处的社会背景的不同,人的知识、意识、行为等各具特色,千人千面,因此,整个 Internet 系统呈现出明显的层次动态变化与组件的多样性。

(3) 演化性。Internet 演化出的整体形态表明无法在设计时确定运行时的状态。尽管主机和网络的动态行为难以确定,接入、互联与交互内容和形式极其随机

---

① Barabasi, A. L, Albert. R. Emergence of Scaling in Random Networks, Science, 1999, 286

② Albert. R, Barabase, A. L. Topology of Evolving Networks: Local Events and Universality, Physical Review Letters, 2000, 85

③ Bak. P. How Nature Works, Newyork: Springer-Verlag, 1996

而复杂；Internet 没有统一的指挥和调度，整个系统似乎处于混沌状态。但是，基于本地位置透明性与节点连接呈幂律分布的超链接互联机制，Internet 这个大规模网络表现出极强的自组织演化能力。多样性、竞争性与选择性的存在，使一些能够满足技术、应用和人类需要的形态得以不断强化，在整体层涌现出特征明显的模式与形态，如网页通过超链接自组织作用涌现出权威网页和中心网页的组织模式，Web 网络中节点与年龄无关的呈幂律分布的连通性[①②]，以及拓扑结构的尺度不变性，使得 Internet 系统动力学特性具有明显的反直觉与惊奇效应。自组织形成了一个动态、有机的整体，并涌现出整体性的行为和智能，从而形成一个人工生态知识系统。

另一方面，Internet 在社会层出现如网络经济、全球化趋势加强、Internet 上强势文化、Internet 的局部失效的强健性与局部攻击的脆弱性等现象，则是 Internet 系统复杂性在社会层上的自组织突现，是 Internet 系统在演化的过程中深刻地影响与改造社会政治、经济与意识形态所涌现出的形态与系统行为。

(4) 巨量性。据估计，Internet 所链接的网络早已超过 100 万个，1 亿多台计算机连接在 Internet 上，超过十亿用户使用 Internet，WWW 上每天新增的网页超过 100 万个，这些以多种媒体表达的海量信息通过 10 亿以上的超链接松散地联系在一起。目前，整个 Internet 上的信息总容量已经难以估计。

面对 Internet 的发展，已经不能进行常规的预测；IBM Almaden 研究中心的专家们认为有把握说的只有一句话，那就是万维网 WWW 势不可挡的发展将继续对这一越来越庞大的网上信息库提出计算上的挑战[③]。Internet 规模的庞大性、Internet 组件的巨量性，使其构成巨型人工系统。

16.3 Internet 系统的研究方法与主要研究问题

前面说明 Internet 系统是开放的复杂巨系统，那么如何研究 Internet 系统呢？Internet 中的哪些问题需要采用巨系统的观点加以研究呢？

16.3.1 Internet 系统的研究方法

前文已经提到，尽管 Internet 中单元和子系统数目庞大、交互复杂、无集中控

---

① Bianconi. G, Barabasi, A. L. Bose-Einstein Condensation in Complex Networks, Phys Rev Lett, 2001, 86

② Huberman, B. A, Pirolli, P. Pitkow, J. E. et al. Strong Regularities in World Wide Web Surfing, Science, 1998, 280

③ Members of the Clever Projiet, Hypersearching the Web, Scientific American, 1999, 280 (6)

制;但在整体上,Internet 是一个演化的人工生态系统。在 Internet 产生和发展过程中,几乎综合了全人类的、整个科学技术体系、古往今来的科学理论、数据和知识,结合了人的知识、经验、直觉与智慧,在其发展历程中体现了从定性到定量的综合集成的思想:通过人机结合的形式,根据需求,制定目标,大胆设想,定性汇总,建立模型,实验检测,发现问题(还包括随着对系统的了解的深入新增的需求,目标和假设),修正需求、目标和假设,完善模型,实践修正,经过多次、多层次、反复的实践与补充,逐渐形成了今天这样的形态,而今天的形态还处于演化和发展之中。可见,这个动态的发展过程就是一个从经验、假设、半理论半经验逐步过渡到定量结果的认识、技术更新与系统演化的过程;Internet 是综合集成的结果,是人类的一项大成智慧工程。

作为一个人机共存、人网合一的人工开放巨型系统,Internet 表现出很高的智能性与社会性,Internet 实质上是一个开放的巨型智能系统[①②],人的因素在这个系统的演化过程中扮演着主导角色。研究这个系统,有效的途径是采用从定性到定量的综合集成法,就是把还原论与整体论结合起来的系统论的方法。

16.3.2　Internet 系统的主要研究问题

Internet 作为一个开放的复杂巨系统,特别是其与社会政治、经济与意识形态之间的密切联系,突现出就有关问题进行系统研究的必要性。在系统层次与社会层次方面的研究还有待开展。目前 Internet 系统与社会层的主要研究问题包括但不限于以下方面:

(1) Internet 系统的动力学特性。Internet 作为一个系统,具有什么样的动力学特征?这个问题已经引起物理学、数学、系统学等多个交叉学科的兴趣。关于 Internet 系统所具有的即便失效强度达到不现实程度节点的通信也不受影响的难以预料的强健性与受主动攻击时的脆弱性[③④]、拓扑结构的尺度不变性、用户增长与业务量发展中的"富者更富"现象[⑤~⑦]、"不可靠的组件形成可靠的系统"与"局部失效无关

---

① 戴汝为,王珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报,1993,19(6)

② 戴汝为,王珏,田捷. 智能系统的综合集成. 浙江科学技术出版社,1995

③ Albert. R,Barabasi,A. L,Jeong. H. The Internet's Achilles Heel:Error and Attack Tolerance of Complex Networks,Nature,2000,406

④ Pastor-satorras R、Vespignani. A. Epidemic Spreading in Scale-Free Networks,Phys Rev Lett,2001,86

⑤ Barabasi,A. L,Albert. R. Emergence of Scaling in Random Networks,Science,1999,286

⑥ Albert. R,Barabasi,A. L,Jeong. H. et al. Power-Law Distribution of the World Wide Web,Science,2000,287

⑦ Bak. P. How Nature Works,Newyork:Springer-Verlag,1996

全局”的容错能力[①]、极低的流行阈值导致的主动攻击的病毒极易大规模扩散[②]、极强的自组织演化能力等，尽管已经得到一些初步的认识；但是，关于 Internet 规律性的上述认识的正确性，以及系统动力学规律的理论体系与计算机仿真研究等都还刚刚起步。比如，采用非线性和统计物理方法研究个别行为与大面积分布的 Internet 整体行为之间关系[③]、Web 系统的直径[④]、WWW 中存在的“小世界”网络的聚集倾向的研究[⑤]；又如，作为人工知识生态系统，是否存在像自然生态系统那样的优胜劣汰、适者生存的规律维持着个体与系统间的动态平衡、整个系统的“乱中有序”与“以不变应万变”的魔力呢？人的在线角色又是如何平衡环境选择与 Internet 系统的动态适应呢？系统动力学特性的研究对于具体技术发展与系统整体规律的把握无疑都是极为重要的。

(2) Internet 与国家安全。Internet 的失效强健性与攻击脆弱性关系到系统物理与社会维的安全，是 Internet 生长与演化的主要问题之一。Internet 的系统安全措施包括物理与社会两方面。物理方面，具有尺度不变性的 Internet 系统并不需要社会网络中病毒大规模流行所需的那样明显的“流行阈值[⑥]”，从而加快了计算机病毒的传播速度与范围，增加了系统不稳定性与预防难度。因此，应结合 Internet 的组织结构与机制研究如何阻止病毒的大范围传播，防止系统局部攻击对整体的影响与防扩散机制等。人为因素越来越成为 Internet 安全的主要问题，其重要性关系到网络运行、国家战略与国防安全。人为利用 Internet 进行蓄意窃听、窃取、攻击与诱导等，已经构成正常工作与生活、经济发展、商业机密、国家战略与国防安全的高技术威胁。应加紧从 Internet 组织机制角度研究网络窃听与反窃听、基于行为的攻击与主动防御等技术；大规模网络的监视、管理与防御机制等。

(3) Internet 与高新技术产业模式。Internet 已经成为科技创新与商业发展的用武之地，经济全球化的依托平台。企业加快工业化向信息化发展步伐，适应网络

---

① Albert. R, Barabasi, A. L, Jeong. H. The Internet's Achilles Heel: Error and Attack Tolerance of Complex Networks, Nature, 2000, 406

② Pastor-satorras R, Vespignani. A. Epidemic Spreading in Scale-Free Networks, Phys Rev Lett, 2001, 86

③ Maurer, S. M, Huberman, B. A. Competitive Dynamics of Web Sites, Research Report, Xerox Pola Alto Research Center

④ Albert. R, Jeong. H. Barabasi, A. L. The Diameter of the World Wide Web, Nature, 1999, 401

⑤ Huberman, B. A, Pirolli, P. Pitkow, J. E. et al. Strong Regularities in World Wide Web Surfing, Science, 1998, 280

⑥ Pastor-satorras R, Vespignani. A. Epidemic Spreading in Scale-Free Networks, Phys Rev Lett, 2001, 86

经济突现的挑战与机遇，必须主动研究 Internet 用户与服务的发展模式给企业信息化与全球化带来的商业运作模式与机会。比如，关于 Internet 的节点连接、用户增长与业务量发展、Web 拓扑结构与超链接分布、用户冲浪规律等研究中所发现的明显规律性，为企业主动适应与发挥 Internet 特点，立足高新技术，构建自己的智能信息化平台、商业模式与发展战略提供了依据与成功的源泉。当然，Internet 给国家与企业带来的机遇与问题还非常多，亟待研究。

(4) Internet 计算问题。Internet 为开展无处不在的计算创造了条件，可也带来了计算上的难度。基于 Internet 的企业信息协作系统的智能化决策、多媒体信息检索与知识发现、路由的选择、高速宽带网络的建设、移动计算等，都因 Internet 的系统复杂性而成为高技术竞争的焦点。在这场关系国计民生的竞争中，研究和适应 Internet 系统的动力学特点，有利于主动寻找关键突破口。比如搜索引擎的设计[①]，Google 充分利用 WWW 组织机制，通过挖掘超链接中的隐藏的信息，将搜索 Internet 看作民主投票，根据网页被链接次数进行网站的排序；如果是权威或中心网站，则加权计分，而使其成为 WWW 上规模最大、最准确、最快捷的搜索工具。

应该说，Internet 作为一个人工物理与社会系统，还有众多的问题有待研究，这些研究的开展对于抢占高新技术制高点、增强企业与国家竞争实力，都具有重要性与紧迫性。

16.4　基于 Internet 的开放巨型智能系统

Internet 的发展与普及，为设计大规模分布式系统以开展复杂巨系统的研究创造了技术与环境条件；同时，由于它本身就是一个人网结合的极其典型的综合集成系统[②]，为解决其他的开放的复杂巨系统问题提供了可以使用或借鉴的系统思想、技术和平台。构建基于 Internet 的开放巨型智能系统，是处理开放的复杂巨系统问题的工程途径。具体地说，就是在从定性到定量的综合集成法的指导下，以 Internet 作为平台与技术基础，建设基于 Internet 的人机协作的网络研讨厅，发挥全球性的 Internet 基础设施、相关的人力资源与数据信息的综合优势，处理常规技术与环境下难以解决的开放的复杂巨系统问题[③④]。

研究和解决开放的复杂巨系统的综合集成研讨厅就其实质而言，是将专家群体(各领域有关的专家)、数据和各种信息与计算机、网络等信息技术有机地结合起来，

---

① Lawrence. S, Giles, C. L. Accessibility of Information on the Web, Nature, 1999, 400

② 操龙兵，戴汝为. 集智慧之大成的信息系统. 模式识别与人工智能，2001，14(1)

③ 戴汝为，王珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报，1993，19(6)

④ 操龙兵，戴汝为. 综合集成研讨厅软件体系结构研究. 软件学报，2002，13(8)

把各种学科的科学理论和人的知识结合起来，由这三者构成系统，这种类型的系统是基于 Internet 的。所说的综合集成研讨厅由研讨终端、中心研讨厅、研讨厅骨干网（Internet 或 WAN）、研讨厅管理服务系统、研讨厅信息资源库，以及分布各地的感兴趣的和相关的研讨群体和技术支持群体组成①。

网络研讨厅采用基于 Intranet/Internet 模式、多媒体技术、虚拟现实技术、数据与知识仓库（汇集以往的知识、现有的知识、研讨中得到的知识，即汇集各种相关的数据与信息，专业知识、经验知识等，以及数据库管理系统）、模型库（汇集模型、参数、算法、事例、现场建模等，以及模型库管理系统）、专家系统、决策支持系统、知识工程和情报分析技术；视频会议系统、多通道人机交互（如手写与语音输入）及信息家电等接入终端与技术；建立一个既有广泛的远程研讨人参加的、又有专家群体在中心研讨厅进行最终研讨决策的、大规律、分布式、自下而上递进式、人机动态交互性的研讨、决策体系，为决策的科学化与民主化提供支持。

近年兴起的多智能体（multi-agent）技术②③具有自主求解与运行时决策、宽而松散的粒度抽象、社会性交互机制、灵活的组织框架与演化机制、人与 Agent 的交互优势等，具有应付开放巨型智能系统复杂性的潜在抽象与计算机制，适于作为构建基于 Internet 的开放巨型智能系统的计算模式④。采用面向 agent 的模式设计的综合集成研讨厅的探索表明，与常规的计算模式相比，具有适于建设大规模分布式系统、更大的灵活性、更快的响应性能和对网络性能的低需求等特性。另外，由于诸如 Internet 的开放的复杂巨系统所具有的特殊复杂性，主流的面向 agent 的抽象机制尚不足以处理这类系统的社会性。为此，我们提出了一种面向 agent 的开放巨型智能系统的社会性抽象机制⑤⑥，建立基于社会抽象的面向 agent 的理论基础与设计方法、社会性交互机制、MAS 组织框架与 agent 构件模式等面向 agent 的开放巨型智能系统的分析与设计机制，将基于 agent 的开放巨型智能系统建成一个多 agent 社会，从而有可能开展人工生态知识系统（如 Internet）的计算机仿真与建立实用开放

---

① Cao，Longbing（操龙兵），Dai，Ruwei（戴汝为）. Human-Computer Cooperated Intelligent Information System Based on Multi-Agents，ACTA Automatics Sinica，2003，29（1）

② Ferber. J. Multi-Agent Systems：An Introduction to Distributed Artificial Intelligence，Boston：Addision-Wesley，1999

③ Wooldridge. M. Agent-Base Software Engineering，IEE Proceedings on Software Engineering，1997，144（1）

④ 戴汝为，王珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报，1993，19（6）

⑤ 戴汝为，王珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报，1993，19（6）

⑥ Cao，Longbing（操龙兵），Dai，Ruwei（戴汝为）. Social Abstraction for Agent-Base Open Giant Intelligent System，In：the 2002 International Conference on Intelligent Information Technology，September，Beijing，China，2002

巨型智能系统的分析与设计体系。

16.5 结论

自从20世纪90年代初开放的复杂巨系统及处理这类系统的方法论提出至今10多年来，通过多个领域的专家的共同努力，从系统学角度，已经揭示出了社会系统、人体系统、地理系统、人脑系统等在系统本质上是开放的复杂巨系统。这些系统都从根本上与自然界密不可分，具有很强的自然演化发展的特点，不太容易让大家所深入理解。而Internet系统基本上可以看作是人类在研究和改造自然的过程中为服务于人类而创造出来的具有网络智能的、全球最大的人工机器系统与特殊复杂的社会系统的结合物，这个系统汇聚着自然界和社会的过去、现在和未来，关系到人们的日常工作与生活，国家的战略与安全；又由于这个系统具有很强的技术性和工程性，比较容易为人们所认识和理解。因此，弄清楚这个系统的本质，对于丰富开放的复杂巨系统理论体系与Internet的发展与利用都具有极其重要的意义；但只有从系统学的角度，才能认清和把握它的本质和规律，即Internet系统是一个开放的复杂巨系统。这个系统本质认识的确立对于更加生动、具体地理解、研究和应用开放的复杂巨系统理论，具有示范和解析作用。

Internet是一个演化而成的综合集成系统，是人类的一项大成智慧工程，可以采用系统论的观点，应用从定性到定量的综合集成法从整体上分析和处理Internet以及相关的系统问题。研究和解决其他的开放的复杂巨系统可以使用或借鉴Internet系统思想、技术和平台。基于Internet构建面向agent的综合集成研讨厅是处理开放的复杂巨系统的一个有效工程途径，这种开放的巨型智能系统具有应付开放的复杂巨系统的特殊复杂性的潜力与机制。

17 数字城市——一类开放的复杂巨系统[①]

作为我国综合实力在经济全球化、全球信息化竞争中的亮点，“数字城市”应运而生。从四川乐山市数字城市规划制定，到广东深圳市民中心楼宇智能化的项目评议，从青岛胶州湾工业园区的数字化建设到深圳市高新技术产业园区综合信息服务系统的可行性研究，预示着东方的数字城市将喷涌而出。就我们所认识到的数字城市而言，它在功能、结构和庞大、复杂的多层次系统，及与周边、全国以至世界的联系等方面，无不具备着开放的复杂巨系统的特性。

17.1 数字城市环境开放，联系广泛

城市是国家的重要组成、重要的行政区划，是政治、经济、文化、教育、科技、区域乃至全国的中心。作为数字城市特别是它的信息、管理、服务和应变及决策体系更应出色地承担起率先发展的各项功能，做到政令贯通、经济发展、文化先进、教育提高、科技创新、人居环境改善、交通环保治理、人文自然和谐、治安消防保障、灾害、破坏防预，提前实现全面建设小康社会，甚至更高级的社会阶段。

除城市的一般环境，与周边地区、全国和全球存在着物质、能量、人员等交换之外，数字城市在信息和管理、服务、决策系统方面更具有其迅速乃至实时、动态乃至连续、科学预后、复杂条理化的需要外，特别是在信息全球化终端极至性和信息通达实时性、决策对策适时性等先进的开放型特色方面，应该体现出信息时代，数字、网络全球一体化的最新成果。

17.2 数字城市的结构层级组合，模式多型化

不言而喻，数字城市的结构非常复杂，它的组件庞大繁多、组成模式也多种多样。仅以信息服务系统为例，就有多层次的宽带多媒体信息网络，地理、地貌信息系统这些基础设施；从子系统讲，分别有电子政务、电子商务、远程教育、网上医疗、物流信息、网上银行、资信监管、数字图书、社会保障、文化娱乐，还有智能交通、安全防范、消防救助、环境监测、灾害预警，以及应急预案、领导决策等多种纵横交错的交互

① 戴汝为. 数字城市——一类开放的复杂巨系统. 中国工程科学，2005，7(8)

式多层级的网络系统。在这么繁杂的系统面前，如何分析？我们从诺贝尔经济奖获得者司马贺针对这类系统所举的钟表匠如何工作的寓言中可以得到启示①。两个钟表匠，一个用H表示，一个用T表示，手艺超群，顾客欢迎，但T穷愁潦倒，H却发达起来。就是因为，一个表由1000个零件组成，T每每放下未装成的表接电话，表就散掉，很少能有连续的足够时间装成一只表。而H则经过设计，用10个零件装成组件，10个组件装成部件，10个部件就装成一只表。因此，他接电话只损失这一小部分时间，他装表只用T所用工时的一个零头，经过计算，T装一只表比H长4000倍！

我们知道像数字城市这样繁复的系统，难免信息交错、子系统或组件之间有时空的交叠，像装表一样会可能产生阻塞以至中断。所以司马贺从处理复杂系统的成功事例总结出，"复杂性的构造：层级结构"。至于层级的处理，司马贺又具体指出，大范围分成三个层级②。至于层级之间、组件和子系统交错之间，其组成模式必然是更加多型兼备，这样才能适应数字城市复杂环境和庞杂功能的需求。

17.3　数字城市组成系统的多样性、交叠性和最终的整体性

要形成一个数字城市，组成它的系统自然是多种多样，层层叠叠的系统套大系统下面还有子系统。各类系统之间的关联，可以想到，既有横向蔓延、树状分叉的空间网络，也有彼此交错的链状，延伸发展。各种系统既是非均质的各向异性，又呈现一定的统一性。例如各楼群、小区的机电设备智能化控制和从市政府到各社区的政令系统各不相同；再如经济发展的信息、决策和人民生活的智能家居，各系统之间既层层分属又密切相关，既功能各异且时空交叠，但它们却统一于"人"的活动和追求发展与完善的发展目标。作为数字城市的所有系统，它总括起来构成经济充满活力、文教科技高度发展、人民生活安定舒适，创造自然、人文、社会融会协调发展的工作与生活氛围，呈现其人类社会发展的整体性前驱。

17.4　数字城市综合系统的自组织和自适应性

从城市的功能和发展前景出发，数字城市的综合系统，特别是支持应变、决策和适时发展的系统，必须具备相应的学习功能，而且是有教师的学习，人-机结合的系统学习的功能③。这样才能呈现优选的自组织性和高阶的适应性。因为在全国、全

① 司马贺著．人工科学——复杂性面面观．（武夷山译）上海科技教育出版社，2004

② 赫伯特．A．西蒙．管理决策新科学．中国社会科学出版社，1985

③ 朱新明，李亦菲．架设人与计算机的桥梁．湖北教育出版社，2000

球日益发展的多种交互影响，自然和社会因素的突发或辐射，包括人的因素、人文环境的动态需求，不可避免地会经常遇到原规划、正常程序中无预案的亟待解决的问题，所以这种自组织和自适应性就十分必要。进一步通过学习程序，把自组织、自适应所取得的经验和范例，在人-机结合的综合智能系统中得到近优化的储备方案，这也正是数字城市综合系统的整体优势和生命力的表现。

17.5 数字城市的整体作用大于各组成系统、各种功能及各部分效应的简单总和

这就是说，复杂系统的整体性质不等于部分性质的和[①]，即 1+1>2。这往往是许多开放复杂巨系统所注重，但实际处理起来比较困难的问题。就数字城市而言，这是关键，也正是从规划到计划、从蓝图到工程、从建设到管理、从运行到改善各个阶段，众多环节中所应着重解决的问题。就已有经验来看，所谓区划当中的聚集效应、中心效应，建设中的软硬件配套效应，运行中的管理效益提升效应，以及中心城市的辐射效应等等应该体现其整体优势。当然，如果处理不好，自然会有其负面效应，例如，经济文化的畸形发展、程序控制与非定性运行的阻塞、结构不良模式的处理应对等等。数字城市具有"根据外部环境的变化，主动地适应地改变自己的决策方法和行为"，系统的动力学行为具有"进化"的含义[②]。这些正是系统复杂性的表现之一，也正是我们要讨论和解决的问题。

17.6 数字城市是一类开放的复杂巨系统

我们把数字城市以上述特点概括起来，无疑地表现出系统中基本单元和子系统成千上万直至上亿；系统组成、组件，在时空、作用及状态之间交互并随系统行为演化派生；系统组件时空交叠、角色各异但宏观上涌现整体行为；系统层次众多、组成模式多种多样；系统与环境存在能量、物质、信息交换、动态连续环境类型，这些均为开放性、复杂性和巨系统的特征。所以，应该说数字城市是一类开放的复杂巨系统[③]。建立这种理念，在数字城市规划、建设和运管当中，从系统复杂性的角度去认识、去处理所遇到的问题，就会有科学的指导思想，达到事半功倍的效果。

---

① 戴汝为主编. 复杂性研究文集. 中科院自动化所复杂系统与智能科学实验室，1999

② 戴汝为，沙飞. 复杂性问题研究综述：概念及研究方法. 自然杂志，1995，2(17)

③ 王寿云，于景元，戴汝为，汪成为，钱学敏，涂元季. 开放的复杂巨系统. 浙江科学技术出版社，1996

17.7 从定性到定量的综合集成是处理数字城市有关问题的方法论

我们面临的是开放的复杂巨系统或者说是广义的复杂系统，解决这类问题方法是从定性到定量的综合集成技术。自从钱学森提出开放的复杂巨系统及其方法论以来，经过两代科学家的不懈努力，对于综合集成技术已经有了明确的认识[①]。从根本上讲是把信息、知识和智慧三个不同层面综合集成起来，从现代技术发展来看，就是通过人-机结合的方法采用信息技术与网络技术来获得新的知识。综合集成是把专家群体(各方面有关的专家)、数据和各种信息与计算技术和网络技术有机地结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来，在这三者的基础上，构建一个智能工程系统，形成一个可操作的平台，从而发挥智能系统的整体优势和综合优势[②]。

对于数字城市管理服务系统而言，通过人机结合的形式采用多智能体技术[③]，根据需求，制定目标、科学设想、定性汇总、建立模型、实验检测，发现问题(还包括随着对系统了解的深入，提出新增的需求，目标和假设)，修正需求、目标和假设、完善模型、实践修正，经过多次、多层次、反复的实践与补充，逐渐形成了今天这样的形态，而今天的形态还处于演化和发展之中。可见，这个动态的发展过程就是一个从经验、假设、半理论半经验逐步过渡到定量结果的认识，技术更新与系统演化的过程；数字城市管理服务系统可以设想为是一个人-机结合的基于多智能体的巨型智能系统[④]。它是从定性到定量综合集成的结果，是一项名副其实的复杂系统工程。

作为一个人机共存、人网合一的人工开放型巨型系统，数字城市管理服务系统表现出很高的智能性与社会性体现自然与人文的和谐发展，一个成功的开放的巨型智能系统，人的因素在这个系统的演化过程中扮演着主导角色。建立这个系统，我们一方面要从认知科学的理论出发，运用人工智能、计算机科学和信息技术的最新成果同时采用从定性到定量的综合集成法，就是把还原论与整体论结合起来的系统论的方法。值得注意的是早在90年代初，曾讨论过建立开放复杂巨系统的一般理

---

① 戴汝为，王珏，田捷. 智能系统的综合集成. 浙江科学技术出版社，1995

② 戴汝为. 人-机结合的智能工程系统——处理开放的复杂巨系统的可操作平台. 模式识别与人工智能，2004，3(17)

③ Ferber. J. Multi Agent Systems：An Introduction to Distributed Artificial Intelligence，Boston：Addison-Wesley，1999

④ Cao，Longbing(操龙兵)，Dai，Ruwei(戴汝为). Human-Computer Cooperated Intelligent Information System Based on Multi-Agents，ACTA Automatica Sinica，2003，29(1)

论问题，当时钱学森就指出[①]：要建立开放的复杂巨系统理论，必须从一个一个具体的开放的复杂巨系统入手。当这些具体的开放复杂巨系统的研究成果多了，才能从中提炼出一般的开放复杂巨系统理论，形成开放的复杂巨系统学，作为系统学的一部分。20 世纪 50 年代形成《工程控制论》[②]就是采用这个方法从一个一个自动控制技术中提炼出来的。

本文从系统科学的角度，概括出"数字城市"是一类开放的复杂巨系统，这对于系统学的进一步发展具有积极的意义。总之，由中国科学家原创的开放的复杂巨系统及其方法论在我们的土地上，建成高水平的数字城市，这是 21 世纪中国对世界的巨大贡献。

---

① 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统. 模式识别与人工智能，1991，1(4)

② 钱学森. 工程控制论. 戴汝为，何善堉译. 北京：科学出版社，1958

18 从工程控制论到综合集成研讨厅体系[①]

18.1 引言

《工程控制论(Engineering Cybernetics)》一书是钱学森于1954年在美国加州理工学院喷气推进中心任教时用英文发表的一本专著。2004年是该书出版50周年纪念,这本专著被公认为是自动控制领域的经典著作之一,50年来也是该领域中引用率最高的文献之一。

1990年钱学森等人发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》[②]开创了我国科学家在系统科学和系统复杂性研究的新领域,为十年后蓬勃发展的国际互联网和在中国大地上兴起的数字城市所证实。1992年他适时地提出综合集成研讨厅的构思,至今经过我国两代科学家的努力,通过智能技术已经建成综合集成研讨厅体系。"我们比他们(司马贺和SFI的研究人员)高一个层次[③]",从而走在了国际系统复杂性研究的前列。

18.2 奠定我国自动控制研究的基础

1955年钱学森冲破重重阻碍从美国返回祖国,回国后任刚建的中科院力学所所长,并任中国自动化学会理事长历时20年。他回国后就在中关村化学所礼堂讲授工程控制论,听众来自中科院的一些研究所、北大、清华等高校的教师与高年级学生约200余人。作者当时刚到力学所工作,有幸参加听课,并负责整理笔记分发听课人员。在美国学习工作了20年的钱学森,刚回国给大家讲工程控制论,给大家印象很深。他讲的是地道的普通话,既流畅又清晰,没有一个英文字,这是花了很大功夫才做到的。记得他多次向所里一位副研询问所要用到的英文术语的中文译名,如

---

① 戴汝为.从工程控制论到综合集成研讨厅体系——纪念钱学森先生归国50周年.自然杂志,2005,27(6)

② 钱学森,于景元,戴汝为.一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论.自然杂志,1990,13(1)

③ 钱学森致戴汝为信件,1998年7月4日

random 这个字，他花了不少功夫琢磨汉语应如何翻译，在课堂上用了“随机”二字。他的讲课能够引人入胜，既有概括又有提高，不带书，粉笔字写得工整秀丽。北大的教师和同学反映，以前很少听过讲得这么好的课。

《工程控制论》是继美国科学家维纳于 1948 年发表的著名《控制论》(关于在动物和机器中控制和通讯的科学)一书后，以火箭为应用背景的自动控制方面的著作，书中充分体现并拓展了《控制论》的思想。据记载维纳曾经于 1935 年在清华数学系与电机系做过访问教授，所以后来有人认为“控制论”的思想可能是作者在中国清华大学时开始的。《工程控制论》是继《控制论》之后，对控制与制导方面进行创造性论述的专著，中国科学家成为推动控制论科学思想的重要代表人物。当时前苏联哲学界，由于《工程控制论》的问世，才从原来对控制论的批判转为后来加以赞扬，可见这种学术思想的效应是多么深远。这一事实于 1960 年在莫斯科举行的第一届国际自控联(IFAC)大会上对维纳的倍加赞扬而得到证实。

《工程控制论》于 1956 年获中国科学院自然科学一等奖。1956 年该书的俄文版问世，1957 年德文版刊出，1958 年中文版正式出版。它是由何善堉与戴汝为在整理 1955 年钱学森在力学所讲授《工程控制论》的笔记，参照英文原书，并吸收俄文版所添加的俄文文献整理而成。《工程控制论》中的一些内容被纳入专业教科书，它成为自动控制领域的一本经典著作。

同时《工程控制论》的讲授和钱学森在科研及工程上的指导为我国培养了一代自动控制方面的专家。他们分别在各自的岗位上取得成就，有的并且从教、担任了大学校长，如西北工业大学原校长戴冠中、汕头大学原校长戴景成、国防科技大学原校长郭桂蓉都是受该书的影响转而从事自动控制研究的。可以说《工程控制论》及钱学森的教学和科研实践奠定了我国自动控制研究领域的基础。

18.3　前瞻性的学术思想

众所周知，《工程控制论》以学术思想的前瞻性而闻名于世，美国斯坦福大学的 D. G. Luenberger 及哈佛大学何毓琦(Y. C. Ho)等教授认为，工程控制论的学术思想在科学界超前 5～10 年，开辟了一系列控制方面的新方向。前苏联的伊万赫年科等则陆续发表了同名的专著，并明确地介绍这是中国钱学森开创的新领域。我国自动控制专家、已故的高为炳曾撰文论述过工程控制论是自动控制领域中引用率最高的著作。

直到近年来，2004 年 11 月在清华大学举行的 International Symposium on Intelligent and Networked Systems 会上瑞典科学院院士、国际著名的自动控制专家 Karl Astrom 在他的报告中介绍了自动控制发展过程中的四本专著，一是詹姆斯·尼克斯与飞利浦斯合著的《伺服系统理论(H. James, N. Nichols, R. Phillips. Theory

of Servomechanisms)》，二是维纳的《控制论(N. Wiener，Cybernetics，on Control and Communication in the Animal and the Machine)》，三是钱学森的《工程控制论(H. S. Tsien，Engineering Cybernetics)》，四是贝尔曼的《应用动态规划(R. Bellman，Applied Dynamic Programming)》。Astrom 还向作者介绍了他当时就读于加州理工学院的情况，《工程控制论》于 1954 年出版前后，该校就开设工程控制论的课程，但当时不是钱学森自己讲，而是他让另外一位年轻的教授讲，他自己与学生坐在一起听，讲得不对或不恰当之处他站起来发言加以阐述，颇为生动有趣。另外，Astrom 等于 2000 年编著的名为《Control of Complex system》一书中引用了《工程控制论》书中的观点。

2000 年 7 月在美国马里兰大学举行了一个控制领域现状及其未来的机会的讨论会，由 Richard M. Murray 为首的一个五人专家小组提出"控制技术在信息丰富的世界中未来的发展方向"中，在有关机器人技术和智能机械方面有下面一段话："控制论工程的目标，在 20 世纪 40 年代甚至更早就已经被明确表达，就是使系统能展现出高度的灵活的展示或对变化的环境作出'智能'反应。在 1948 年，麻省理工学院的数学家 Norbert Wiener 给出了一个对控制论进行了广博的虽然是完全非数学的描述。钱学森通过与控制导弹有关的问题的驱动，于 1954 年提出了可作更多数学解释的《工程控制论》。这些工作及那时候其他的工作的聚合，形成了在机器人技术和控制的现代工作中大部分智力的基础"。

科学的真知灼见表现在其对发展的前瞻性，50 年前问世的《工程控制论》一书中对这门新的科学的论述至今仍让人难以忘怀。该书的前言中有如下一段话：

"这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素，可是在其他各门自然科学中这些因素却是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质，以及整个系统的综合行为。"

18.4　青出于蓝而胜于蓝

钱学森在美国东部的 MIT 取得硕士学位后，就到西部的加州理工学院师从应用力学大师冯·卡门，他在攻读博士学位期间已经取得了优异的成绩。当时在可压缩气体方面所提出的卡门——钱学森公式，后来成为空气动力学方面教科书中的内容而传之后世。1955 年钱学森冲破重重阻力准备返回中国之前，曾经由夫人蒋英、儿子永刚和女儿永真陪伴，并且带着在加州理工学院的物理力学讲义和不久前出版的《Engineering Cybernetics》等材料和书籍向恩师告别。冯·卡门接过材料翻阅后，说了大意如下的一段话："你在学术上的成就已经超过了我。因为有你这样一位学生我感到骄傲"。几十年后，当 1991 年钱学森获国家杰出贡献科学家奖时，有记

者采访询问他获得大奖是否很激动？回答出人意料，他说并不激动。因为自己一生已经激动过三次了，第一次激动就是与导师告别时导师所说的上述一段话。当时自己感到在美国学习和工作了 20 年将回中国为祖国人民服务，在学术上国际大师认为超过了自己，所以感到十分激动。实际的情况正是这样，在此之前在应用力学方面，冯·卡门已经把自己所承担的工作大多交给达到自己水平的钱学森了，而这位学生又在物理力学及工程控制论等方面，自己未进行过的研究工作领域做出了卓越的成绩，真是青出于蓝而胜于蓝了。

18.5 对系统科学三个层次的杰出贡献

钱学森于 1955 年返回祖国后，在我国的"两弹一星"及航天技术的发展方面所做出的贡献是家喻户晓的，不仅如此他还以学识的渊博受到大家的尊敬。他在 20 世纪中期有过一个预言：可以预料，从某种意义上说，20 世纪末到 21 世纪初，将是一个学科交叉的时代。我们回顾钱学森近 30 年来的科学研究活动，可以看到他在系统科学、思维科学及复杂性科学等等方面都有开创性的及奠基性的工作。他所阐明的现代科学技术体系设想，更加体现了钱学森在众多领域中的博大精深。这里只略述在系统科学领域的贡献。

按照钱学森关于现代科学体系的观点，他认为自己对于工程控制论的工作是系统科学的技术科学层次，系统工程是工程应用层次，而开放的复杂巨系统理论则属于系统科学的基础科学层次。他给我们留下了珍贵的科学著作：

* 《Engineering Cybernetics》 1954 年
* "组织管理的技术——系统工程" 1978 年
* 《论系统工程》 1982 年
* "一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论" 1990 年
* 《智慧的钥匙》钱学森论系统科学 2005 年

总之，钱学森从工程控制论开始，进一步解决工程应用的问题，1990 年提出开放复杂巨系统(OCGS)及处理这类系统的方法论，即以人为主、人机结合，从定性到定量的综合集成法。这里，需要做一点解释：1990 年提出综合集成法表达为"定性与定量相结合的综合集成法"，后经过讨论，改为"从定性到定量的综合集成法"。

钱学森在系统科学领域：以技术科学层次开创；在实践中不断的拓宽工程应用；在这种深厚的技术和工程背景下，发展到系统学的基础层次，从而对系统科学做出了全面的贡献。

当前，国内提出科学的发展观，在中华民族振兴屹立于世界的伟大进程中，我们面对着许多急需处理的与开放的复杂巨系统(OCGS)相联系的复杂问题，如社会经济发展，自然环境的生态保护问题，一些关键领域发展的决策以及构建和谐社会等

重大问题。近年来大家开始了解到，Internet 及其用户就是 OCGS 的典型。大家关注的数字城市，由大量城市楼宇住户及城市中的住户与居民，以及商务系统，政务系统等等组成的城市也就是一个 OCGS，因而开放的复杂巨系统科学是 21 世纪的科学[①]。钱学森在 1991 年发表的“再谈开放的复杂巨系统”一文中曾强调过他的看法：中国的社会主义建设必须考虑国际的影响，只有从一个一个具体的开放复杂巨系统入手进行研究，当这些具体的开放复杂巨系统的研究成果多了，才能从中提炼出一般的开放复杂巨系统理论，形成开放的复杂巨系统学，作为系统科学的一部分。20 世纪 50 年代形成工程控制论就是采用这个办法，是从一个一个自动控制技术中提炼出来的。在进行科学研究的过程中，从实际出发是个十分重要的问题，在开放的复杂巨系统及系统复杂性的研究中应以此为鉴。对开放的复杂巨系统而言，实践经验和资料累积最丰富的是社会系统和人体系统；前者是关系到国家事务的大问题，后者是涉及人民健康发展的大问题。这正是今天构建和谐社会当中的重要问题，而钱学森十几年前就提出了处理开放复杂巨系统的方法论，我们不禁更加为他的关心国家民族振兴并且为之无私奉献的精神所折服。

18.6　推动思维科学、系统科学的交叉发展

钱学森早在 20 世纪 80 年代就提出开展思维科学的研究；并提出思维科学研究的突破口在于“形象思维”的研究；他在 1991 年的“再谈开放的复杂巨系统”一文中，明确地论述了研究这类系统要有正确的指导思想；要用思维科学的成果；从定性到定量的综合集成技术，实际上是思维科学的一项应用技术；研究 OCGS 一定要靠这个技术。应用技术发展了，也会提炼、上升到思维学的理论，最后上升到思维学的哲学——认识论。在思维科学研究的策略上，再次表现出了钱学森依托技术背景重应用、讲效果，在不断实践中发展并上升到理论的科学务实作风。

1992 年 3 月 2 日，钱学森给他当时的秘书王寿云将军的信中提出“从定性到定量的综合集成研讨厅”的构思，汇总了下列成功的经验：

(1) 几十年来世界学术讨论的 seminar；

(2) C^3/I 及作战模拟；

(3) 从定性到定量的综合集成法；

(4) 情报信息技术；

(5) “第五次产业革命”；

(6) 人工智能；

(7) “灵境”技术；

---

① 戴汝为. 复杂巨系统科学——一门 21 世纪的科学. 自然杂志，1997，19(4)

(8) 人-机结合的智能系统;

(9) 系统学等;

……

在信中并认为,这又是一次飞跃。

在该信发出后,他于3月6日又给当时863计划智能计算机主题的负责人汪成为写信,谈到:最近我向王寿云提出一个新名词,叫"从定性到定量综合集成研讨厅体系",是专家们用计算机(可能几十亿次/秒)和信息资料情报系统一起工作的"厅"。这个概念行不行请您们研究。一个星期后的3月13日,钱学森又给本文作者写信,信中谈到:最近我已告王寿云和汪成为。现在再向您说,我们的目标是建成一个"从定性到定量的综合集成研讨厅体系"。这是把专家们和知识库信息系统、各种AI系统、几十亿次/秒的巨型计算机,像作战指挥演示厅那样组织起来,成为巨型人机结合智能系统。组织二字代表了逻辑、理性,而专家们和各种AI系统代表了非逻辑、非理性智能。所以这个厅是21世纪的民主集中制工作厅,是辩证思维的体现!自20世纪初以来,发达国家中成功的科学研究中心,都有所谓Seminar,我在Caltech就有幸参加过这种活动,印象很深,这真是民主集中!在社会主义中国,我们应该把这个宝贵经验与毛泽东思想加现代科学技术结合起来,这就是厅。10天之后钱学森从思维科学的角度给作者写了另一封信,信中主要谈到:我想到一个问题:人的思维能力是不断发展的:① 人类的历史含有此意;② 一个人的思维能力也如此。那么它又是怎样发展的呢?第一是人脑这个开放的复杂巨系统就有很强的可塑性,是活的不是死的、不变的;第二加实践的作用。……而思维科学的任务就是从思维的角度找出思维能力发展的途径并付诸实施,当然这里首先要解决:什么叫思维能力?也就是什么叫聪明、智慧?我们要研究的从定性到定量的综合集成研讨厅体系就是完成思维科学这一任务的一个建议[①]。

这样,把思维科学的应用技术,综合集成法来处理系统科学的基础科学开放的复杂巨系统有关问题,推出它在应用层次的实践形式,从定性到定量的综合集成法研讨厅体系,这是钱学森在思维科学和系统科学交叉研究中的贡献,是自然科学和人文科学交融的体现。正如马克思所预言:"自然科学往后将会把关于人类的科学总括在自己下面,正如同关于人类的科学把自然科学总括在自己下面一样[②]。"

---

① 钱学森致王寿云、汪成为、戴汝为信件,1992年3月2日～1992年3月23日,引自开放的复杂巨系统.浙江科学技术出版社,1996

② 马克思.经济学——哲学手稿.北京:人民出版社,1957

18.7　构建综合集成研讨厅体系

钱学森对构建综合集成研讨厅(HWME)赋予了极大关注与多方面的指导,在1992～1999年当中他在给作者的几十封信中多次提到综合集成研讨厅的关键和特点并对之进行了深刻的论述。例如谈到:辩证思维、社会思维、“泛化”的形象思维、研讨厅体系是同时结合形象思维和逻辑思维,因而是创造思维的好范例;人机结合的重要作用和深远意义;研讨厅体系就是知识发现技术等方面,从而形成了综合集成研讨厅的理论框架。

在国家自然科学基金委员会的大力支持与资助下,作者所在科研集体对OCGS和综合集成研讨厅进行了十多年的研究,经过智能系统的综合集成,知识工程的应用,人机结合理论的实践以及研讨厅的结构设计,信息技术软硬件的开发与具体构建等阶段。目前,已经研制成功了一个可用的研讨厅系统,已通过有关部门的验收,并多次在国内外进行演示,正在一些领域推广应用①。

作为思维科学(认知科学)的一项应用技术,与其他各种方法论不同的是,综合集成研讨厅体系不是一系列的公式的汇总,也不是以某几条公理为基础搭建起来的抽象框架。其实质是指导人们在处理复杂问题时,把专家的智慧、计算机的高性能和各种数据、信息有机的结合起来,把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来,构成一个统一的、人机结合的巨型智能系统和问题求解系统。这个方法论的成功应用在于发挥该系统的整体优势和综合优势。其核心在于人的心智与机器高性能的取长补短、综合集成。

其中对人的性智的利用,涉及到思维科学(认知科学)的研究,机器智能涉及到人工智能研究,两者之间的结合则有赖于人机交互技术。从这几种角度出发,通过长期研究,认为实现综合集成研讨厅体系,其实质就是针对与OCGS相关的某一类问题,构建一个以综合集成为基础的智能工程系统,作为可操作的工作平台。例如对于宏观经济决策支持问题,其解决途径就是建立一个包含宏观经济数据、知识、模型、建模方法的综合集成支持体系,作为操作平台。对于不同的复杂问题,则更换与问题有关的专家与数据、方法即可处理,使得该平台可以解决一些OCGS所派生出来的复杂问题。

从构建基于综合集成的智能工程系统,实现可操作的平台出发,研制重点在于:① 充分利用信息技术(核心是网络技术和计算机技术);② 从软硬件体系和组织结构上实现该系统,使之应用于复杂问题的研究实践。涉及到的关键问题包括:人机

① 戴汝为.基于智能技术的综合集成研讨厅体系.香山科学会议第262次学术讨论会中心议题报告,北京,2005

结合导致群体智慧的涌现;研讨组织方法研究和专家群体的有效交互规范;知识管理;系统开发方法;模型集成机制;人机交互方法;信息协作推荐技术等。

在综合集成研讨厅的概念中,“厅(hall)”的含义在于:研讨厅是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的“厅”,是把专家们和知识库、信息系统、人工智能系统、高速计算机等像作战指挥厅那样组织起来,形成巨型的人机结合的智能系统。其最初的构思类似综合了上述系统的会议厅。

随着 Internet 和网络的迅速普及,深入人们工作和生活的每一个层面,“cyberspace(电子空间或数字空间)”成为一个重要的概念,它使参与者跨越时间和地域的限制,随时随地就所关心的问题进行研究、交流和探讨,并可随时利用网络上的大量资源,无论是本地的,还是远程的。信息技术的这个发展,为综合集成研讨厅的实现提供了一种新的、可能的形式,是对传统“厅”的一种扩展。因此,可建立基于 cyberspace 的综合集成研讨厅,即 Cyberspace for Workshop of Metasynthetic Engineering。从 HWME 到 CWME 是信息社会条件下,对 HWME 的一种具体化,一方面意味着信息技术尤其是网络技术的飞速发展,为实现这一人机结合的巨型智能系统和工作空间提供了可能。另一方面,也说明,要建立实际可用的研讨厅系统,切实可行的方案是充分利用信息技术的成果,构建一个分布式系统。

钱学森预见到这种空间的扩展,他指出:“有关老词是 noosphere(思维圈),新词的 virtual reality 似宜仍用‘灵境’;而 cyberspace 是人-机结合的思维思想活动世界,似可称为‘智慧大世界’,简称‘智界[①]’”。通过基于综合集成研讨厅体系的建成,实现了钱学森的科学构思,从综合集成研讨厅体系广阔的应用前景中,我们更加体会到钱学森对我国系统科学、思维科学和系统复杂性研究领域的高瞻远瞩。

18.8　创新思维在碰撞中闪光

近年来,国际科学界“复杂性研究”崛起[②],被称为是 21 世纪的重要科学领域之一。认知科学以其和人类自己发展的紧密联系以及与环境结合凸显出来的“现场”作用而昭示了日益重要的作用,因而成为当前的四大基础研究领域之一。因为钱学森提出:“复杂巨系统只能用‘从定性到定量的综合集成法’和‘综合集成研讨厅’加以处理解决”,所以我们比人工智能和认知科学家美国的司马贺和国际上在复杂性研究领域享有“尼采的狂放世界”之称的 SFI 的研究人员高一个层次。这意味着在处理复杂巨系统有关问题的方法论和可操作性领域,我们走在国际前列。

钱学森在思维科学方面的许多精辟论述:例如人的思维能力提高,人-机的相互

---

① 钱学森致戴汝为信件,1995 年 2 月 2 日

② 戴汝为,沙飞. 复杂性问题研究综述:概念及其研究方法. 自然杂志,1995,17(21)

作用，从定性到定量综合集成法；对于认知科学和系统复杂性研究阐述了一些重要的观点等，这些对我们开展认知科学与思维科学结合进行研究会起到指导性的作用。同时，他为我们在研究方法和注重实践、体现可操作性方面树立了一个典范。正如《文汇报》对钱学森的报道中所说："从科学史上看，大科学家变成大思想家的也不乏其例，但钱学森与他们又有些不一样。他没有离开工程科学的本色，即他提出的思想很有操作性，他不光是提出一个思想原则就算了，而且有一整套操作的技术，从思想方法一直到最后技术上的实施，有一整套的方法"。这值得我们认真学习。

现在看来，钱学森的一些学术观点，已在其后的科学实践中得到证实。回顾半个世纪以来他在学术上的创新观点，从其提出到被学界所认识，再到通过工程实践加以实现，这个过程充满着发现、置疑、非议、探讨和认同，这也正是许多前瞻性的学术思想、观点在科学史上的共同经历。50 年前《工程控制论》问世之初并未受到重视，15 年前"开放的复杂巨系统及其方法论"发表时，也曾面临一度淡漠。但时间的烟尘并未掩盖思想创新的光芒，现在这些学术思想的前瞻性已为科技的发展和社会的进步得到证实。这次综合集成研讨厅体系的构建得以实现，其中应该特别提及的是我国科技体制改革所建立的"香山科学会议"对创新思想的支持。"香山科学会议"以其前沿性、前瞻性和交叉性、综合性而著称，曾有人媲美美国的高登会议(Golden Research Conferences)。从 1994 年 7 月第 20 次会议对开放复杂巨系统方法论展开讨论；1997 年 1 月第 68 次会议对其在理论与实践上的进展进行大视野、多角度、高层次的学科交叉和研究讨论，钱学森在会议的书面发言当中，从科学方法论的高度再次论证了开放的复杂巨系统及其方法论的有效性；1998 年 12 月第 110 次会议上，以控制论与科学技术革命为题，阐述了控制论、工程控制论对科技进步的巨大影响并缅怀了维纳和钱学森的杰出的科学贡献；紧接着，4 个月之后的第 112 次会议以"复杂性科学"为主题，沟通各领域科学家对复杂性科学的认识，探讨我国复杂性科学研究的方向，对系统概念的重要以及开放的复杂巨系统的观点进行了深化的探讨[①]。历时 6 年，经过了对开放的复杂巨系统的具体研究和构建综合集成研讨厅的工程实践，在开发出可操作的平台的基础上，于 2005 年 9 月举行了 262 次"香山科学会议"，主要由军事系统工程科技人员参与，主题是"从定性到定量综合集成研讨厅的理论与实践"。会议对"从定性到定量综合集成方法"和研讨厅体系的重要方法论意义和实践价值进行了充分探讨和认识。认为现代军事系统是典型的开放复杂巨系统，运用"从定性到定量综合集成研讨厅体系"的理论和方法解决军事系统的科学决策问题，有着十分重要的现实意义。这几次香山科学会议贯串着对钱学森的开放复杂巨系统和综合集成研讨厅等学术观点的探讨与深化，在其实践和发展中发挥了重要作用。正如香山会议十年历程文集的标题所示："创新思想在碰撞中闪光"。

---

① 创新思想在碰撞中闪光. 中国环境科学出版社，2003

19 基于综合集成的研讨厅体系与系统复杂性[①]

19.1 引言

本节着重阐述近20年来，关于系统学(Systematology)与思维科学(Noetic Science)在中国交叉发展的情况。通过钱学森亲自倡导的讨论班的研讨所得到的群体智慧的启发，以及钱老本人一方面进行精心的思考与研究，并亲自通过各种交流方式，指导国内一些科学家及所在单位参与研究，使系统学在我国取得了巨大的进展，使我国在系统复杂性的研究方面，具有十分明显的特色。概而言之，提出了开放的复杂巨系统(Open Complex Giant Systems——OCGS)的概念以及对几类开放的复杂巨系统进行了较深入的探讨，从工程系统进入社会系统，开辟了一个新的技术领域；提出"从定性到定量的综合集成法"作为处理开放的复杂巨系统的方法论；着眼于人的智慧与计算机的高性能两者结合，以思维科学(认知科学)与人工智能为基础，用信息技术和网络技术构建"综合集成研讨厅(Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering)体系"，以可操作平台的方式处理与开放的复杂巨系统相联系的复杂问题。

总之，以开放的复杂巨系统为对象，提出了方法论，并给出处理某些复杂巨系统相联系的复杂问题的可操作平台，这项研究充分体现了钱学森及中国科学家在系统复杂性方面作出的巨大贡献。

19.2 系统学与开放的复杂巨系统

19.2.1 复杂性科学

随着科学技术的飞速发展和社会的进步，越来越多的复杂事物和现象进入人们的视野，例如社会经济问题、生态环境问题、可持续发展问题、工程技术与人文社会相结合的问题等。在采用传统的理论、技术、方法处理这些问题时，学者和决策者们

① 戴汝为，李耀东. 基于综合集成的研讨厅体系与系统复杂性，系统科学与复杂性科学，2004,1(4)

遇到许多根本性的困难。其中重要一点在于，近代科学学科、条块分割日益精细的局面，反而模糊了人们对事物的总体性的、全局性的认识。面对这一现状，德国著名的物理学家普朗克认为："科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物本身，而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在从物理到化学，通过生物学和人类学到社会学的连续的链条，这是任何一处都不能被打断的链条"。与此不谋而合的是，早在100多年前，马克思就曾预言："自然科学往后将会把关于人类的科学总括在自己下面，正如同关于人类的科学把自然科学总括在自己下面一样，它将成为一个科学。①"

因此面对着越来越复杂的问题，许多研究者开始探索从整体出发的研究方法，试图寻找那条被打断的"沟通链条"。正是在这样的背景下，"复杂性科学"逐渐孕育、萌芽，并受到越来越多学者的关注，成为一门"21世纪的科学②③"。在这方面，国外比较有代表性的工作是欧洲以普利高津和哈肯为代表的远离平衡态的自组织理论和美国以圣菲研究所(SFI)为代表的复杂适应系统理论以及司马贺的人工科学④。

远离平衡态的自组织理论面向的是组成单元非常多，非常庞大的系统。普利高津提出的耗散结构理论以非平衡热力学和相变理论为基础，运用非线性微分方程以及随机过程等数学工具，揭示出某些生命系统和非生命系统的共同特点，沟通了非生命系统和生命系统的内在联系，说明这两类大系统之间并没有严格的界限，表面上的鸿沟是由相同的规律所支配的。耗散结构的理论是对系统宏观性质的研究，还没有和系统的微观性质联系起来。与普利高津同时代的哈肯的协同学则沟通了从微观到宏观的通路，使系统在宏观上表现出来的规律能和微观上的运动联系起来。远离平衡态的研究是欧洲复杂性研究的代表，但是从目前的情况来看，普利高津和哈肯所研究的系统特性仍属于"简单巨系统⑤"特性的范畴，可以直接用统计学等定量工具进行处理。当这些方法运用到更复杂的系统中时，遇到了根本性的困难⑥。

成立于20世纪80年代中期的美国圣菲研究所，提出了一个新的领域——复杂性科学，试图解答那些常规学科范畴无法解答的突发问题。他们认为这些动态复杂

---

① 马克思，恩格斯. 马克思恩格斯全集(第42卷)，北京：人民出版社，1981

② Waldrop, M. M. *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, Schuster, New York, USA, 1992

③ 戴汝为. 复杂巨系统科学——门21世纪的科学，自然杂志，1997，19(4)

④ 戴汝为. 系统科学及系统复杂性研究，系统仿真学报，2002，14(11)

⑤ 钱学森. 创建系统学，山西科学技术出版社，2001

⑥ 王寿云，于景元，戴汝为，钱学敏，汪成为，涂元季. 开放的复杂巨系统，浙江科学技术出版社，1995

问题有许多共同之处，属于同一类系统，即复杂性适应系统[①]。复杂性不仅包括物理、化学，也应囊括生物学、信息处理、经济学、政治科学以及人类生活的每一个方面。复杂适应系统包括经济、人脑、免疫系统、生态系统、细胞、生物群落以及人类社会的文化和社会制度，比如政党和科学社团等。SFI把计算机作为从事复杂性研究的最基本工具，用计算机模拟相互关联的繁杂网络，观察复杂适应系统的涌现行为。近年来，与SFI相联系的一些科学家拓宽了复杂性的研究内容，把兴趣逐步转移到对混沌边界、生物信息以及复杂网络等的研究上。总体来看，SFI认识到复杂性研究的困难在于不能用传统的方法来处理复杂系统所涉及的问题，并提出了复杂性科学这一概念。但研究这种复杂性的科学方法到底是什么，至今还没有提出明确的方法，仍处于探索和困惑之中[②]。

此外，诺贝尔奖获得者、美国学者司马贺(H. A. Simon)早在1969年就率先构思出“人工科学[③]”的概念，据此将经济学、认知心理学、学习科学、设计科学、管理学、复杂性研究等贯穿联系起来，给人以启迪。

19.2.2 系统学

在国外学术界开始对复杂系统、复杂性进行研究的同时，我国的科学家也独立地进行着相关的开拓性工作。从上个世纪80年代开始，我国著名的科学家钱学森倡导并亲自参与了三个讨论班：人体科学讨论班、思维科学讨论班和系统学讨论班。这三个讨论班对提炼“开放的复杂巨系统”这一概念起到了很大的作用。

国内以“开放的复杂巨系统”及其方法论为代表的系统复杂性研究，具有自己的特色，那就是从系统科学出发，把“开放的复杂巨系统”的研究作为创建系统科学的基础层次——系统学(Systematology)的突破口，进而建立起系统科学从基础理论到工程实践的整个体系结构。

按照钱老提出的现代科学技术体系结构，系统科学是现代科学技术体系中的一大部门。在系统科学体系中，处在应用技术层次上的是系统工程，这是直接用来改造客观世界的工程技术；处在技术科学层次上，直接为系统工程提供理论方法的有运筹学、控制论、信息论等；而处在基础理论层次上的便是系统学。

钱老于1954年出版的*Engineering Cybernetics*属于系统科学技术科学层次上的工作，于1978年发表的“组织管理的技术——系统工程”一文，于1982年出版的《论系统工程》等都属于应用技术层次上的工作。这些开创性的工作已经受到国外

---

① Waldrop, M. M. *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, Schuster, New York, USA, 1992

② Horgan. J. From Complexity to Perplexity, *Scientific American*, 1995, 272(6)

③ 司马贺著. 武夷山译. 人工科学——复杂性面面观，上海科技教育出版社，2004

的关注。德国的系统科学家哈肯曾经以书面形式表示过："系统科学的概念是中国学者较早提出的，这对理解和解决现代科学，推动它的发展是十分重要的。中国是充分认识到系统科学巨大重要性的国家之一。"1979 年，钱老在一次学术报告中，进一步提出了建立系统学的任务。

系统学是研究系统结构与功能（系统的演化、协同与控制）一般规律的科学[①]。对于所有系统来说，系统结构和外部环境决定了系统功能；系统结构及外部环境的改变必然引起系统功能的变化。揭示这些规律便是系统学的基本任务。把控制与管理的思想和概念引入到系统学，是一个重要的学术思想。系统学不仅要以揭示的系统规律去认识系统，而且还要在认识系统的基础上去控制或管理系统，使系统具有我们所希望的功能。

事物常有两个方面，一个是事物的结构，另一个是其属性。而事物的主要属性之一是复杂性。我国科学家正是抓住这一特点，提出了开放的复杂巨系统概念。与此相应，提出了处理开放的复杂巨系统的方法论，从定性到定量的综合集成法，这些工作成为创建系统学的重要内容。

其中尤为重要的是，在钱老的指导下，系统学的创建不是走由下而上的路线，即由简单系统、大系统和简单巨系统等的研究而上升到复杂巨系统的研究；而是走自上而下的路线，即首先研究开放的复杂巨系统，找到处理这类复杂巨系统的方法论。然后以此为主干，在各种不同条件下，分支出简单系统、大系统和简单巨系统及其处理方法。也就是从开放的复杂巨系统学来建立系统学，即由繁到简。

同时，要建立开放的复杂巨系统的一般性理论，必须从一个一个具体的开放的复杂巨系统入手，积累相关的研究成果，才能从中提炼出开放的复杂巨系统的一般理论。在这一点上，我国科学家与国外科学家不同，不是从复杂性的抽象定义出发，而是从实际出发，把复杂性与系统概念结合起来，从方法论角度来区分复杂性和简单性问题。钱老在 20 世纪 80 年代就指出："凡现在不能用还原论方法处理的，或不宜用还原论方法处理的问题，而要用或宜用新的科学方法处理的问题，都是复杂性问题，复杂巨系统就是这类问题。"这样，就从系统学的角度，给了复杂性一个清晰和具体的描述。

19.2.3　开放的复杂巨系统

"开放的复杂巨系统"这一概念的领域的提出，经历了长期探索的过程，大致经历了巨系统→复杂巨系统→开放的复杂巨系统三个阶段[②]。

1979 年，在钱学森的一篇文章"组织管理社会主义建设的技术——社会工程"

---

① 钱学森. 创建系统学，山西科学技术出版社，2001

② 卢明森."开放的复杂巨系统"概念的形成，中国工程科学，2005，6(5)

中，提出了“巨系统”的概念，并认为“巨系统的特点有两个：一是系统的组成是分层次、分区域的。……另一个特点是系统大了，作用就不可能是瞬时一次的，而要分成多阶段来考虑”。此后，钱学森又对巨系统理论进行了多次阐述和总结。到 1987 年，又发展了“巨系统”的概念，提出了“复杂巨系统”，提炼出“复杂巨系统”的基本要点：① 协同学研究的是简单巨系统，如气体、激光系统，子系统种类不多，相互作用的规律比较简单，不能用来处理人体这样的复杂巨系统；② 复杂巨系统“不但子系统的数量非常之多，上亿，几十亿，而且这个系统的种类花样也非常多，不是几种、几十种，而是成千上万种花样”，“又形成各种不同的、各层次结构的互相作用，复杂极了”；③ 人体是复杂巨系统，社会也是复杂巨系统，此外还有生态系统、地理系统等。同时总结到“当前对于如何处理复杂巨系统，在系统学中还没有成功的理论”。

从一开始，像社会系统、人体系统、地理系统等这样一些复杂巨系统的“开放”属性，就受到国内科学家的关注。“开放的复杂巨系统”这一概念在不断的讨论、总结、提炼中逐渐形成。1990 年，钱学森、于景元、戴汝为在《自然杂志》上合作发表了论文“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[①]”，明确地阐述了“开放的复杂巨系统”(OCGS)的概念。

概括起来，OCGS 具有如下特性：

(1) 开放性。系统与外部环境以及子系统之间存在能量、信息或物质的交换，就系统与环境的关系而言，开放表现为最复杂与最常见的不确定的、动态连续的环境类型。复杂性不仅体现在系统本身，而且体现在环境。

(2) 多层次性。从已经认识到的比较清楚的子系统到可以宏观观测的整个系统之间层次很多，甚至有几个层次也不清楚。子系统或者组件的组成模型多种多样，有的甚至不清楚具体模式，或是一些基本模式的组合，或是变异体。

(3) 涌现性。系统是由时空交叠或分布的组件构成的。肩负不同角色的组件间通过多种交互模式、按局部或全局的行为规则进行交互，组件类型与状态、组件之间的交互以及系统行为随时间不断改变，系统中子系统或基本单元之间的局部交互，经过一定的时间之后在整体上演化出一些独特的、新的性质，形成某些模式。

(4) 巨大性。系统中基本单元或子系统数目极其巨大，达到成千上万甚至到数以亿计。

同时，众多 OCGS，例如经济和社会有关的巨型系统，往往表现出人-机共存的特点，在系统中人既是系统的高级智能组件，也是系统演化发展的关键因素，对这类系统的处理，不能仅靠机器处理，还需要发挥人及群体的知识、智慧与创造性。

OCGS 理论刚诞生时，在广大的科技界尚缺乏共识。10 年后，面对全世界影响

---

① 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论，自然杂志，1990，13(1)

深远的 Internet，我们不得不为我国老一辈科学家的前瞻性论断所折服。Internet 可以看作是人类在研究和改造自己的过程中为服务于人类而创造出来的具有网络智能的、全球最大的人工机器与几亿用户共同构成系统与特殊复杂的社会系统的结合物。这个系统汇聚着自然界和社会的过去、现在和未来，关系到人们的日常工作与生活，国家的战略与安全。又由于这个系统具有很强的技术性和工程性，呈现了人文与科技相融合的态势，这不正是典型的 OCGS 吗？事实上，上世纪 90 年代初期，钱老就明确指出，信息网络加用户是个开放的复杂巨系统，信息网络建设是一项复杂的社会系统工程。

近年来，有关数字城市、数字社区甚至数字国家的构想与实践成为社会、经济生活的一种潮流。对于数字城市，包含了大量的子系统，例如电子政务系统，电子商务系统，各种安全、管理系统，大量的生活、内容服务系统，每个系统又具有各不相同的、繁杂的结构和组成部件、基础设施，形成复杂的层次结构，加上各方面的管理者、维护者、用户，系统的基本单元和子系统数目都极其巨大，达到几十万，甚至上千万的数量级。该系统又是开放的，它不是一个数字孤岛，不断地与其他系统进行信息的交换，因而也是一个典型的开放的复杂巨系统。

此外，目前人们所关心的许多问题，例如生态环境问题、可持续发展问题等，都涉及到多个 OCGS 之间的相互作用。如果从 OCGS 的角度来理解、研究这些问题，有利于人们认清问题的本质，获得较好的解决方法。

总之，从“开放的复杂巨系统”这一概念提炼的过程，不难发现，该过程实际上就是对“复杂”与“复杂性”不断研究、反复认识和深入刻画的过程。其关键在于，把“复杂性”置于系统之中，“复杂性”不是个空泛的概念，而是系统的“复杂性”，与系统不可分割。“复杂性”实质上是 OCGS 的动力学特性，或 OCGS 学的问题。由于 OCGS 也把复杂系统、复杂巨系统和开放的简单巨系统视为这类系统的特殊情况，所以复杂性的研究自然也把这些系统的动力学特性概括在其范畴之中。这就对复杂性的研究方向有了一个清晰的把握，不但是对系统科学的重大贡献，同时也是我国科学家对复杂性科学的原创性创新。

19.3　从定性到定量的综合集成法

在提炼“开放的复杂巨系统”这一概念的同时，我国科学家们认识到由于这类系统的复杂性超出了当前科学理论方法所能处理的范畴，因而需要探索新的理论方法体系，来处理人类社会所面临的越来越复杂的问题，因而也一直在考虑着研究这类系统的方法。

1986 年，钱学森在一次讲话中提到，软科学是定性方法与定量方法相结合的；软科学研究离不开三个要素：第一是信息、情报资料，情况要搞清楚；第二，为了定性

与定量相结合，专家的意见非常重要，一定要有渠道搜集专家的经验和判断；第三，要定量，建立模型，在搜集资料以后，请专家讨论、提意见；然后，根据专家的意见来建立模型，上电子计算机计算；算的结果，再请专家来评审，反复进行。这个过程，就是理论与实践相结合、定性与定量相结合的过程。这一方法可称之为“定性与定量相结合的系统工程方法[①]”。

此后，钱学森进一步发展了这个方法，在 1990 年的论文“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”中，不但明确描述了开放的复杂巨系统概念，同时提出了研究这类系统的方法论：“定性与定量相结合的综合集成法”。这个方法是在社会系统、人体系统、地理系统这三个 OCGS 研究实践的基础上提炼、概括和抽象出来的。

“在这些研究和应用中，通常是科学理论、经验知识和专家判断力相结合，提出经验性假设（判断或猜想）；而这些经验性假设不能用严谨的科学方式加以证明，往往是定性的认识，但可以用经验性数据和资料以及几十个、几百个、上千个参数的模型对其确定性进行检测；而这些模型也必须建立在经验和对系统的实际理解上，经过定量计算，通过反复对比，最后形成结论；而这样的结论就是我们在现阶段认识客观事物所能达到的最佳结论，是从定性上升到定量的认识”。

“从上所述，定性与定量相结合的综合集成法，就其实质而言，是将专家群体（各种有关的专家）、数据和各种信息与计算机技术有机结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来。这三者本身也构成一个系统。这个方法的成功应用，就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势”。

1991 年，在多次学术讨论的基础上，根据钱学森的建议，在《模式识别与人工智能》杂志上发表了两篇论文“再谈开放的复杂巨系统[②]”和“从定性到定量的综合集成技术[③]”，钱学森将定性与定量相结合的综合集成法发展为“从定性到定量的综合集成法”。它强调了思维动态、辩证的性质。其中“从定性到定量”就是从感性认识到理性认识，从定性的、不全面的感性认识到综合定量的理性认识。在这一过程中，人工智能和知识系统可以发挥重要作用，“法”即技术工程，是综合集成工程，综合集成工程位居思维科学（认知科学）的工程技术层次，是思维科学（认知科学）的一项应用技术。

“定性与定量相结合的综合集成法”与“从定性到定量的综合集成法”，看起来只是文字上稍有差异，而事实上这是非常不同的两种思路。从科学发展的过程来看，这个方法论是把还原论与整体论结合起来，既超越了还原论也发展了整体论，是系

---

① 卢明森.“从定性到定量的综合集成法”的形成与发展，中国工程科学，2005，7(1)

② 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统，模式识别与人工智能，1991，4(1)

③ 戴汝为. 从定性到定量的综合集成技术，模式识别与人工智能，1991，4(1)

统学的一种新的方法论。其理论基础是思维科学；方法基础是系统科学与数学；技术基础是以计算机为主的现代信息技术；哲学基础是马克思主义实践论与认识论；实践基础是系统工程的实际应用①。

19.4 综合集成研讨厅的理论框架

从定性到定量综合集成法的提出，是系统科学和思维科学（认知科学）交叉发展的产物，它从思维科学（认知科学）的角度，阐述了研究 OCGS 及相关问题所应采取的思路。沿着这一思路，钱学森在 1992 年又提出了人-机结合、从定性到定量的综合集成研讨厅体系（简称研讨厅体系）。研讨厅体系的理论框架包括：① 几十年来世界学术讨论的 Seminar；② C^3I 及作战模拟；③ 从定性到定量的综合集成法；④ 信息情报技术；⑤ “五次产业革命”；⑥ 人工智能；⑦ 灵境技术（Virtual Reality，现一般译为虚拟现实）；⑧ 人-机结合的智能系统；⑨ 系统学等。

“这个研讨厅体系的构思是把人集成在系统之中，采取人-机结合、以人为主的技术路线，充分发挥人的作用，使研讨的集体在讨论问题时互相启发，互相激活，使集体创见远远胜过一个人的智慧。通过研讨厅体系还可把今天世界上千百万人的聪明智慧和古人的智慧（以知识工程中的专家系统表现出来）统统综合集成起来，以得出完备的思想和结论。这个研讨厅体系不仅具有知识采集、存储、传递、共享、调用、分析和综合等功能，更重要的是具有产生新知识的功能，是知识的生产系统，也是人-机结合精神生产力的一种形式”。

利用综合集成研讨厅体系求解复杂问题的大致步骤如下：

（1）明确问题和任务。

（2）搜集大量的有关文献资料，认真了解情况，召集相关专家利用研讨厅体系的软硬件平台对问题进行研讨。

（3）通过研讨，结合专家自己的经验和直觉，获得对问题的初步认识。

（4）依靠专家的经验和形象思维，在问题求解知识的帮助下，提出对复杂问题结构进行分析的方案。

（5）根据复杂问题结构的特点，结合领域知识和前人经验，把问题分析逐步或者逐级定量化。

（6）在定量化或者半定量化的情况下，（在计算机上）建立问题的局部模型或者全局模型，这些模型既是对相关数据规律的一种验证，也包含了专家们的智慧和经验。

（7）在局部模型和全局模型基本上得到专家群体的认可后，讨论如何合成这些

① 钱学森. 创建系统学，山西科学技术出版社，2001

模型以生成系统模型。

(8) 系统模型建立后，通过计算机的测算和专家群体的评价验证模型的可靠性，如果群体对模型不满意，那么需要重复上述的(3)～(8)，或者其中的某几个步骤，直到专家群体基本满意，建模过程才能结束。

这个方法综合了许多专家的意见和大量书本资料的内容，不是某一个专家的意见，而是专家群体的意见，是把定性的、不全面的感性认识加以综合集成。这样，综合集成研讨厅体系就明确地将综合集成法中的个体智慧上升为群体智慧。按照此思路构建的综合集成研讨厅体系，将是一个综合了专家体系、计算机体系和知识信息体系的人-机结合的巨型智能系统。

随着研究的进展以及构建综合集成研讨厅实用系统的实践，近年来又获得了对该方法论的进一步表述[①]，那就是针对某一类 OCGS，对于与其有关的问题，也就是复杂问题，构建一个智能工程系统，作为可操作的工作平台，组织相关专家使用这个平台，对复杂问题进行研究和处理。对于属于该复杂巨系统的同一类问题，则更换与平台有关的专家及数据即可处理。这一表述指明了研讨厅体系具体化、实用化的方向，清晰概括了综合集成研讨厅构建的原则和实质。

从定性到定量的综合集成法和人-机结合、从定性到定量的综合集成研讨厅体系，是复杂性科学界第一个明确提出的研究系统复杂性的方法论，它从思维科学(认知科学)的高度，阐述、归纳了如何发挥专家群体智慧、计算机的高性能以及知识、信息的作用，以提高人的认识能力，处理那些采用传统方法无法处理的、极其复杂的问题的方法，是我国科学家对发展复杂性科学的又一重大贡献。目前，实际的研讨厅系统已经成功构建，表明这一理论框架已经基本上具体化、实用化。

19.5 综合集成研讨厅与思维科学(认知科学)

根据钱老提出的现代科学技术体系，思维科学是其中的一大部门，其基础理论层次是思维学，包括形象(直感)思维、抽象思维、创造性思维和信息学；技术科学层次包括模式识别、数理语言学、情报学和科学方法论；工程技术层次包括人工智能、计算机模拟技术、情报资料库技术、计算机软件工程和密码技术等。

作为思维科学的一项应用技术，综合集成研讨厅体系构成了一个人-机结合的巨型智能系统。关于人的智慧的研究和利用涉及到思维学，关于机器智能的研究和实现则涉及到人工智能、情报资料库技术、计算机软件工程等多个方面。因此，综合集成研讨厅与思维科学有着密不可分的联系。

---

① 戴汝为. 人-机结合的智能工程系统——处理开放的复杂巨系统可操作平台，模式识别与人工智能，2004，17(3)

19.5.1 人工智能与知识工程的引入

在“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”一文中，钱老就明确提出“综合集成还可以用知识工程”，认为“综合集成方法取得了很好的效果。在解决问题的过程中，专家群体和专家的经验知识起着重要的作用。在以前……这一综合的过程还没有使用机器，建立模型也是靠人动脑子思考。现在看，我们还可以进一步，在一个系统中加入知识这一极其重要的因素。这就牵涉到知识的表达和知识的处理，实际上就是知识工程的问题了。知识工程是人工智能的一个重要分支，解决问题的办法着眼于合理地组织与使用知识，从而构成知识型的系统。专家系统就是一种典型的知识型系统。专家的一部分作用可通过专家系统来实现，所以专家系统也自然是系统中的子系统。……人不能脱离社会而存在，随着社会的发展，人类创造各种机器来代替体力劳动与部分脑力劳动，结果具有智能行为的机器必然也是子系统。由人、专家系统及智能机器作为子系统所构成的系统必然是人-机交互系统。各子系统互相协调配合，关键之处由人指导、决策，重复繁重工作由机器进行。人与机器以各种方便的通讯方式，例如自然语言、文字、图形等，进行人-机通讯，形成一个和谐的系统”。

在“再谈开放的复杂巨系统”一文中，又强调了“我们在做定性的工作中，一开始就要综合大量的信息资料，这个工作就要用知识工程，而且一定要用知识工程，因为信息量太大了，光靠手工是无法完成的。还有‘人大’、‘政协’会上有大量提案，这都是专家意见，都是有根据的，很重要，但也不见得全面，需要将这些意见进行综合，这也要用知识工程、人工智能，这是我们从定性工作开始时要做的一部分”。

因此，把人工智能、知识工程引入综合集成研讨厅意味着，除了广泛搜集专家意见外，搜集各种知识的范围还可以扩大，可以从数据库、知识库以及当今庞大的信息库——Internet 上搜集大量的知识，这些用人工来完成是十分困难的，但是用计算机可以做到，尽可能地把一切有用的东西都集成起来，实现“人帮机、机帮人”。“这是真正的现代化方法，把信息技术、计算机、人工智能和知识工程统统用上了[①]”。

沿着这一思路，作者所在的科研集体对人工智能技术，尤其是巨型智能系统的构建进行了深入研究。对当时几种流行的构建巨型智能系统的方案进行了归纳和概括[②]，把它们分为四大类：封闭类巨型智能系统、半封闭类巨型智能系统、半开放类巨型智能系统、开放类巨型智能系统，其依据在于：无论在研制过程还是问题求解过程中，“封闭”的智能系统就是一个“自力型”的系统；相反，“开放”的智能系统是一个“社会型系统”。其中综合集成研讨厅属于开放的巨型智能系统，与其他巨型智能系

① 钱学森. 创建系统学，山西科学技术出版社，2001

② 戴汝为，王珏，田捷. 智能系统的综合集成，浙江科学技术出版社，1995

统相比较，开放的巨型智能系统堪称“社会智能系统”，具有如下特点[①]：

(1) 系统中不仅包括计算机子系统，也包括人，由此导致了研究人在智能系统中的作用及人-机通讯等问题。

(2) 系统中的成员在实际问题求解中动态地组成层次结构，同时这些层次在一个求解过程中也是变化的。

(3) 在系统中，成员的个性包括表示、推理甚至组成是多种多样的。

(4) 系统组成自身也是动态的。

从综合集成的方法出发，其关键问题在于：① 人-机体系；② 系统理论的原理在AI中的应用。其重要性与紧迫性逐渐呈现在国家及社会的发展之中。

19.5.2 人-机结合的重要意义

在1993年，国家八五基础研究重大项目（或称国家攀登计划）中，列了一个“认知科学前沿领域若干重大问题研究”。作者所在的科研集体承担了三个子项之一：思维与智能的模拟。这个项目的总体目标是通过研究思维与智能的模拟来构建智能系统，进而形成OCGS理论。经过五年的工作，推动了人-机结合智能系统的发展，一个重要的收获是把智能系统的研制建立在综合集成方法论的基础上，并建立了一个巨型智能系统的体系（包括从定性到定量的综合集成研讨厅）。

同样，通过这项研究，得出结论：综合集成研讨厅是人工智能技术发展的一次突破，将人作为被综合集成的对象所产生的问题，将是综合集成研究中最复杂的课题[②]。因为在这个课题中，综合集成的想法将从算法、模型的综合集成扩展到感知、认知等方面的综合集成。这里综合集成的意义不是系统仅仅由简单的多种模块所组成，而是根据问题在某时刻的需要在系统理论意义下动态地构成社会团体的若干个子集，在不断的信息交流的过程中求得解（一般是局部解）。系统具有进化的特征，它可以不断成长、不断提高。

在人-机结合的巨型智能系统实践方面，1996年在国家863智能计算机组的支持下，由航天工业总公司710所、中科院自动化所、华中理工大学承担了“宏观经济智能决策支持系统(MEIDSS)”的研究和开发。MEIDSS是根据从定性到定量的综合集成法进行设计的。它是一个人-机结合的系统，人、机之间通过可视化的知识开发环境进行知识共享和知识生产，系统通过“知识封装”技术封装各相关模块，形成统一接口，实现了人、机智能互补，有效利用智能技术，进而实现“人帮机、机帮人”的智能决策支持。MEIDSS在坚持以人为主路线的同时，大大增强了机器体系的功

---

① 戴汝为. 人-机结合的智能工程系统 —处理开放复杂巨系统的可操作平台，模式识别与人工智能，2004，17(3)

② 戴汝为，王珏. 关于巨型智能系统的探讨，自动化学报，1993，19(6)

能，这就更便于人-机结合，以人为主进行知识的综合集成。实际运行表明，这个系统的开发是成功的，受到了有关方面的肯定和好评。

从思维科学的角度来看，综合集成研讨厅在处理复杂问题时采取的是“人-机结合、以人为主”为主的综合集成策略。这一方法的核心在于把人的“心智”与计算机的高性能结合起来。按照我国科学家熊十力的观点，人的心智由“性智”和“量智”两部分组成。“性智”是一种从定性的、宏观的角度，对总的方面巧妙加以把握的智慧，与经验的积累、形象思维有着密切的联系，是人们通过文学艺术活动、不成文的实践、感受得以形成的；“量智”是一种定量的、微观的分析、概括与推理的智慧，与严格的训练、逻辑思维有着密切的联系，是人们通过科学技术领域的实践与训练得以形成的。所以，从信息处理的角度来看，综合集成法就是把人的“性智”和“量智”与计算机的“高性能”信息处理相结合，达到定性的(不精确的)与定量的(精确的)处理互相补充。因此在解决复杂问题的过程中，能够形式化的工作尽量让计算机去完成，一些关键的、无法形式化的工作，则靠人的直接参与或间接作用，构成“人-机”结合的系统。这种系统既体现了“心智”的关键作用，也体现了计算机的特长。这样一来人们不仅能够处理极为复杂的问题，而且通过“从定性到定量的综合集成”，达到“集智慧于大成”。

19.6　基于信息技术与网络技术的综合集成研讨厅

在国家自然科学基金委员会的大力支持与资助下，作者所在科研集体对 OCGS 和综合集成研讨厅进行了 10 多年的研究，重点在于人机结合理论的实践以及研讨厅的设计与实现问题。目前，已经研制成功了一个初步可用的研讨厅系统，已通过有关部门的验收，并多次进行演示。

19.6.1　从 HWME 到 CWME

在综合集成研讨厅的概念中，“厅(Hall)”的含义在于：研讨厅是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的“厅”，是把专家们和知识库、信息系统、人工智能系统、高速计算机等像作战指挥厅那样组织起来，形成巨型的人-机结合的智能系统。其最初的构思类似综合了上述系统的会议厅。

随着 Internet 和网络的迅速普及，深入人们工作和生活的每一个层面，“Cyberspace(电子空间或数字空间)”成为一个重要的概念，它使参与者跨越时间和地域的限制，随时随地就所关心的问题进行研究、交流和探讨，并可随时利用网络上的大量资源，无论是本地的，还是远程的。信息技术的这个发展，为综合集成研讨厅的实现提供了一种新的、可能的形式，是对传统“厅”的一种扩展。因此，可建立基于 Cyberspace 的综合集成研讨厅，即 Cyberspace for Workshop of Metasynthetic Engineer-

ing。

从 HWME 到 CWME 是信息社会条件下对 HWME 的一种具体化，一方面意味着信息技术尤其是网络技术的飞速发展，为实现这一人-机结合的巨型智能系统和工作空间提供了可能；另一方面也说明，要建立实际可用的研讨厅系统，切实可行的方案是充分利用信息技术的成果，构建一个分布式系统。

19.6.2 研制的构思与重点

从以上对综合集成研讨厅体系的描述可以看出，作为思维科学（认知科学）的一项应用技术，与其他各种方法论不同的是，综合集成研讨厅体系不是一系列的公式的汇总，也不是以某几条公理为基础搭建起来的抽象框架。其实质是指导人们在处理复杂问题时，把专家的智慧、计算机的智能和各种数据、信息有机地结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来，构成一个统一的、人-机结合的巨型智能系统和问题求解系统。这个方法论的成功应用在于发挥该系统的整体优势和综合优势。其核心在于人的心智与机器高性能的取长补短、综合集成。

其中，对人的性智的利用涉及到思维科学（认知科学）的研究，机器智能涉及到人工智能的研究，二者之间的结合则有赖于人-机交互技术。从这几种角度出发，通过长期研究，认为实现综合集成研讨厅体系，其实质就是针对与 OCGS 相关的某一类问题，构建一个以综合集成为基础的智能工程系统，作为可操作的工作平台。例如对于宏观经济决策支持问题，其解决途径就是建立一个包含宏观经济数据、知识、模型、建模方法的综合集成支持体系，作为操作平台。对于不同的复杂问题，则更换与问题有关的专家与数据、方法即可处理，使得该平台可以解决一些 OCGS 所派生出来的复杂问题。

从构建基于综合集成的智能工程系统，实现可操作的平台出发，研制重点在于：① 充分利用信息技术（核心是网络技术和计算机技术）；② 从软硬件体系和组织结构上实现该系统，使之应用于复杂问题的研究实践。涉及到的关键问题包括：人-机结合导致群体智慧的涌现；研讨组织方法研究和专家群体的有效交互规范；知识管理；系统开发方法；模型集成机制；人-机交互方式；信息协作推荐技术等。

19.6.3 CWME 的体系结构

在实际实现时，综合集成研讨厅体系可以视为一个由专家体系、机器体系、知识体系三者共同构成的虚拟工作空间。一方面，专家的心智、经验、形象思维能力及由专家群体互相交流、学习而涌现出来的群体智慧在解决复杂问题中起着主导作用；另一方面，机器体系的数据存储、分析、计算以及辅助建模、模型测算等功能是对人心智的一种补充，在问题求解中也起着重要作用，知识体系则可以集成不在场的专家以及前人的经验知识、相关的领域知识、有关问题求解的知识等，还可以由这些现

有知识经过提炼和演化，形成新的知识，使得研讨厅成为知识的生产和服务体系。具体来说：

（1）专家体系由参与研讨的专家组成，它是研讨厅的主体，是复杂问题求解任务的主要承担者，其中主持人的作用尤为重要。专家体系作用的发挥主要体现在各个专家“心智”的运用上，尤其是其中的“性智”，是计算机所不具备的，但是问题求解的关键所在。

（2）机器体系由专家所使用的计算机软硬件以及为整个专家群体提供各种服务的服务器组成，机器体系的作用在于它高性能的计算能力，包括数据运算和逻辑运算能力，它在定量分析阶段发挥重要作用；

（3）知识/信息体系则由各种形式的信息和知识组成，它包括与问题相关的领域知识／信息、问题求解知识／信息等，专家体系和机器体系是这些信息和知识的载体。

综合集成法把这三个部分组合成为一个整体，形成一个统一的、人-机结合的巨型智能系统和问题求解系统。综合集成研讨厅的成功应用就是要发挥这个系统的整体优势和综合优势。因此，要讨论综合集成研讨厅体系的实现问题，需要逐个考虑这三个体系的实现问题。其中：

（1）专家体系的建设涉及到专家群体的角色划分问题，专家群体不良思维模式的预防及纠正，专家个体之间的有效交互方式，研讨过程的组织形式问题，等等；

（2）机器体系的建设涉及到基本系统（包括软件、硬件）框架的设计、功能模块和软件模块的分析与综合、软件系统开发方法的选择等问题；

（3）知识／信息体系的建设则涉及到知识——尤其是定性知识和非结构化知识的表达与抽取问题、知识的共享、重用和管理问题、信息的获取和推荐问题，等等。

与此相适应，作为可操作的平台，CWME 的实际结构与所提供的功能包括三个中心、七种服务（见图 19-1）。

其中研讨中心为研讨厅中的专家提供接入服务和研讨服务，包括输入/输出方式、多媒体会议、资源共享等；信息协作中心为专家提供信息协作服务，包括信息的获取、筛选、过滤等；数据中心为专家提供专业资源服务和决策支持服务，系统管理服务和系统支持服务是为系统管理员提供的系统管理、资源调配接口。系统的整个结构以及研讨中心和信息协作中心是与问题无关的。面向不同问题时，只需要更改数据中心的内容，因而整个系统可视为一个通用的平台。

19.6.4　CWME 的软件系统

它包括以下几个主要部分：

（1）通信基础设施：研讨厅内部以及与外部通信的软硬件设施，包括物理网络、底层网络协议以及构建于其上的一些基本通信服务，如安全管理、目录服务等。该

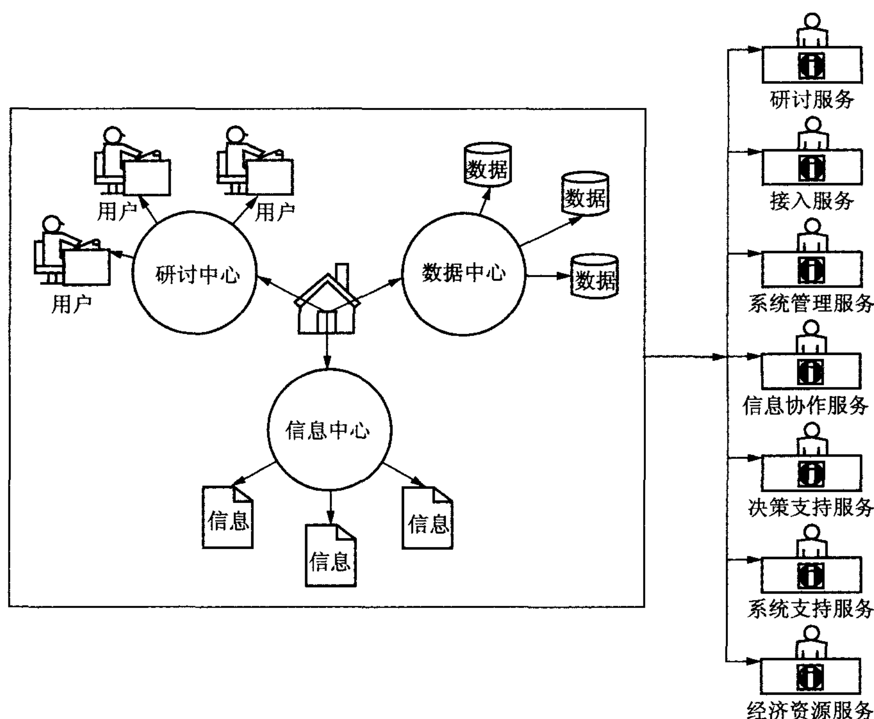


图 19-1 CWME 体系结构

模块可利用现有的通信设施(如局域网、Intranet、Internet 等)和通信协议(如 TCP / IP、HTTP 等),然后根据具体要求,在应用层上添加一些必要的模块,如流媒体传输、身份认证等。

(2) 多媒体信息共享平台:为研讨厅内专家之间的资源共享提供支持,如文本/音频/视频数据的压缩与传送、文件共享、应用程序共享、计算机的互操作等。它是专家之间讨论、交流的基础平台,研讨中心直接建立在该平台之上。

(3) 研讨服务平台,该平台包括多个子模块,例如:

a) 群体智慧的涌现及可视化模块。该模块以研讨厅的序列有向属性图模型为基础,采用超链接引导的主题搜索算法(HITS),分析专家发言之间的响应关系,发现、并用图形的方式展示专家群体智慧涌现的过程;

b) 研讨组织模块。为主持人引导、规范、组织讨论过程以及专家之间的交互提供支持,其功能包括研讨秩序的维持、研讨流程的设定、转换与控制,专家群体的有效互动对话规范和防止群体思维过度发散等,其根本目的在于促进专家之间的互相激发、集思广益、消除不必要的隔阂、创造良好的讨论氛围、促进问题的深入讨论;

c) 广义专家。万维网(WWW)汇集了人类有史以来所能利用和创建的海量信息、知识,它本身构成了一个开放的复杂巨系统,具有深刻的内部结构。WWW 中面

向特定问题的权威网页可以看作是某些特殊“专家”针对该问题的观点，这些权威网页是WWW经过自组织“推荐”出来的，是数以百万计的网民群体智慧的体现。这些特殊“专家”与研讨厅内的人类专家组成广义专家群体，彼此可以交互，这样就使得研讨厅讨论的成果不仅仅是若干个人类专家智慧的集结，而且包含了成千上万的网民智慧。

d）信息过滤模块。研讨厅的专家来自于与复杂问题相关的多个领域，每个人研究的重点不同，需要不同的相关信息。WWW上丰富的信息资源为信息获取带来的极大的便利，但同时，信息的爆炸性增长，使得通过一般搜索技术得到的大部分信息是无用的。信息过滤模块则利用兴趣相似的专家之间的“推荐”作用，采用协作过滤的方法，通过提供个性化的建议来克服信息过载问题。

e）模型支持模块。这里的模型支持模块并非针对具体的模型，而是指现有模型的可视化组合与重用。对于一些现有的、同类型的模型可以使用该模块进行集成，通过简单的鼠标拖放操作，将多个局部模型与全局模型相连，形成一个整体模型。不同模型间的输入/输出连接、权值可以在交互界面中进行调整，同时触发各个模型的重新计算，实现模型重组的“所见即所得”。

人-机交互，提供人-机界面，是专家进行研讨、检索、建模等所有工作的前端模块，提供发言文本／音频／视频／电子白板等输入、输出工具、共享资源的使用工具，计算机互操作工具、建模、模型运算结果的显示、群体智慧涌现过程的可视化显示、意见分析的可视化显示等，它是研讨厅专家的“研讨终端”，是专家参与研讨的前端平台。

19.6.5　CWME与社会思维

社会思维是指人作为社会整体对客观现实的认识，它是在整个社会时间、社会关系的基础上，无数个人思维和各种群体思维交互作用、多元复合的观念体系。社会思维学认为，人的思维是集体的，人作为集体来进行思维，思维的主题不是个体而是集体；集体讨论是社会思维的主要形式，集体成员之间的相互对话、讨论、反驳、自省等都是激发群体及个体智慧的有效手段。

但是由于缺乏合适的工具和手段，对社会思维的研究一直没有找到可行的思路。综合集成研讨厅充分体现出社会思维，其中人-机结合导致的群体智慧的涌现，由于采用了信息技术，尤其是计算机技术和网络技术实现了CWME，便有了研究社会思维的一个平台。通过对组织型学习理论、对话理论在CWME中的应用和实验，通过观察CWME中群体智慧涌现的过程，通过建立综合集成研讨厅的序列有向属性图模型描述专家思维之间的交互作用关系，CWME成为社会思维研究的一个实验场，由此获得的结果对社会思维的研究具有积极的启发意义，并很可能为之开辟一条可行的道路。

19.6.6 CWME 的功能特色

作者和他的同事经过四年多的努力，投入由博士后和博士生为主的科研人员参加的数十人的科研工作，研制完成了上述以 Internet 为基础的分布式研讨厅雏形系统，该系统具有较强的可操作性，表现在：

(1) 人-机结合，以人为主；人在该系统中始终起指导作用，让使用者回归到了现实社会中的人和人的沟通、交流当中。

(2) 面向网络；提供了目前最可靠的和易用的基于 Web 的协同工作平台，适合有广泛交流沟通需求的一切企业、机关、研究单位等。

(3) 多种形式的资源共享以及计算机之间的互操作，有利于将存在于专家大脑里的知识以可视化的方式进行共享，同时减少了软件集成的设计工作和服务器的负担。

(4) 实时跨平台协作，从 Windows 延伸到 Mac、Unix 和 Linux，做到研讨厅无处不在。

(5) 多媒体接口设计，充分使用即时语音交流、手写汉字识别、指纹识别(用于身份认证)、视频会议等多媒体手段。

(6) 结合知识管理，体现了研讨厅是一个知识的生产与服务体系，实现了民主集中的工作空间。

本节以上部分介绍了处理社会经济系统中，有关宏观经济决策支持这个复杂问题所进行的综合集成研讨厅的研制情况，在研制过程中，遇到许多理论上和方法上的问题，通过努力得以解决或初步解决。

上述系统曾于 2003 年 9 月在维也纳的国际应用系统分析研究所(IIASA)的复杂系统建模研讨会上介绍、演示，引起各国专家的很大关注，认为在解决复杂系统问题时具有较强的可操作性；进而对这一具有中国原创特色的综合集成研讨厅系统有了一定的认识和理解。在 2005 年 1 月举行的与该系统有关的基金项目验收会上，评审专家也一致认为该系统已经基本达到了可操作的程度，建议推广至国家有关部门进行使用。

下　　篇

信息空间智慧的涌现

20 钱学森关于人-机结合的论述[①]

人发明了车，坐车能代替人走路，但车又不能取代全部人走路的功能；有了车，还得下车会走！人工智能或模拟智能代替一部分人脑的工作，但不能全部代替，人脑还是要的。所以我不同意智能机能全部代替人，也不会有什么机器人打败真的人！

1989 年 5 月 14 日

我今天想说的中心意思是：智能计算机是非常重要的事，是国家大事，关系到 21 世纪我们国家的地位。如在这个问题有所突破，将有深远的影响。

我们要研究的问题不是智能机，而是人与机器相结合的智能系统。不能把人排除在外，是一个人-机智能系统。

机器是帮助人、使人的作用发挥得更加充分。我建议 863－306 的名称应改为“人-机智能系统”。人脑是开放的巨系统，计算机也是一个巨系统，再加上情报、资料、信息库……而成为一个人-机智能系统。我们的目的就是构造这样一个系统，它就成为“总体设计部”的不可缺少的支撑了。因此，我们才称它为尖端技术，应列为国家攻关项目，应有相应的保密措施，因为它关系到社会主义的胜利。

……是开步走，因为它是目前能够做得到的部分，是使老办法能多做些工作。对我们最终所要争取的目标，现在我们大家还不知道如何实现呢，还要深入研究。我们要认识到我们的局限性，现代科学的局限性。我们目前只是对我们所要解决的问题有点认识而已，但如何解决？尚待探索，现在我们还没门呢！

目前机器还没法解决的事，先让人来干。等机器能做的事慢慢多起来时，人也就被解放得多一些了，人就能发挥更大的作用了。

归纳而言：

（1）人的意识活动是很丰富的，包括自觉的意识、潜意识、下意识，人是靠这些来认识世界的。

（2）为了认识世界和改造世界，人始终发挥着主导的作用，我们要研究的是人和机器相结合的智能系统。

（3）现在还不可能很快实现这种人-机智能系统，目前只能做些“妥协”，实事求

① 辑录自钱学森给戴汝为的信件、讲话。

是，尽量开拓当前计算机的科学技术，使计算机尽可能地多帮助人来做些工作。我希望把最终实现人-机智能系统这件事赶快定下来。这应该是 863－306 的目标。……

因此，当前的工作是研究现在能够做些什么，还有哪些是现在不能做的(讨论班的内容也应该是这样)。思维科学的突破口是形象思维。……

……读些不是本行的书，把思想拓得宽一些，扫一扫整个人类的全部知识领域，这不算耽误时间，要借助讨论班，动员大家去扫。从传统的、国外的影响下解放出来，站在马克思主义哲学的高度来看这件事。马克思主义哲学是智慧的源泉。

1991 年 4 月 18 日

近日读了一些报道，看来用 vitual reality 来管理生产，组织飞机起飞降落于繁忙的机场，以至艺术音乐现场演出都大有可为，这“灵境技术”可能是比较现实的人-机综合智能系统，21 世纪会有大发展。你们专题领导小组似应讨论。

1991 年 7 月 13 日

为了您写辩证思维的重要文章，我提请注意《马克思恩格斯选集》第 3 卷 545 页及 546 页上两段文字。

我们搞人-机结合的智能系统，就是叫电子计算机及信息系统干它们能干的“理性”的事，把人留在只有人脑这个复杂巨系统才能干的“非理性”的事；并让两者有机地结合起来。这至少是个技术革命！

1991 年 10 月 25 日

见到您元月 21 日来信后，我一直在思考，我很同意您的看法。总之，机器是很有用的，但还是人用机器，人-机结合中人仍是主人。因此我们要改进人的感知能力，Multi-media 技术(江总书记在不久前的宣传部长会议上的讲话用了“大众传媒”技术这个词)及“灵境”技术都是这个目的。Lenat、Feigenbaum、Hewitt 的工作也是这个目的。当然，外国人的这些工作我们都要利用。

1993 年 1 月 25 日

是“人-机结合”还是“人-机一体化?”用后者似乎更彻底些，但我看“人”的工作毕竟不同于“机”的工作。能“一体化”吗？所以还是用“人-机结合”是人利用机器，机器辅助人，人还是比机要高一些。您和姜莉楠设计的体系不也是证明吗？

1994 年 6 月 28 日

近日来，我们的思想似又有点发展，即：“机”不是代替人，而是协助人，是人-机

结合，而人-机结合又分两个阶段：

(1) 目前的信息革命会导致人-机结合的第一阶段；

(2) “灵境”技术的发展将导致人-机结合的感受，是更高层次的结合，也是人-机结合的第二阶段……

我们能不能设想：第一阶段在我国于2010年实现？这也是进入发达时代所需要的。

1996年3月10日

21 钱学森关于大成智慧的论述[①]

……现在的任务之一是说服人、团结一切可以团结的人。因此想到那些搞模糊系统、灰色系统的人。近日又见您的学会筹备组办的《思维科学通讯》1992 年 3 期，……我们有这个信心，就如同 1921 年中国共产党成立了，才几十人的党就看准了中国人民的前途，一条充满光明的大道！也正如党的方针之一是团结一切爱国自强力量一样，我们今天也要团结上述这些搞思维科学的散兵游勇，组织“统一战线”，为建立从定性到定量综合集成研讨厅体系的伟业而努力。

……我们的事业是伟大的，我们是要把古今中外千亿人的头脑组织成为一个伟大的思维体系，复杂超巨型系统。可否称之为“大成智慧工程”？

1992 年 10 月 19 日

……我在想：新的 1993 年对我们的“大成智慧工程”将带来什么呵？能开拓多少？看我们的努力了！

奉上去年早就收到的一位 37 岁的中青年写的书，任平：《广义认识论原理》，我在节日里才翻看了看，感到他讲的实是社会思维学，……

我请您看看这本书，是讲能不能找位同志认真搞一搞社会思维学，即人的集体加工信息技术该怎么工作？这不也是“大成智慧工程”的一个因素吗？

1993 年 1 月 2 日

我在 1988 年 2 月 2 日，在有您参加的一次会上讲过“思维系统”，朱梧贾的工作就是思维系统的建立中的工作。他的 CL 是一阶逻辑？还是现代的更广的多阶逻辑？应该把 ML 与多阶逻辑体系的关系搞清楚。另一方面，将来 ML 也要呈现出结构，把形象（直感）思维和灵感（顿悟）思维包括进去；最后综其大成的是社会思维了。这才是思维系统，是大成智慧学了。

翻看了 Arnheim 的书，感到说得好，是我们多年来一直宣传的观点。我还要仔细读，您我有何心得再交流吧。总之，这是本好书，应多加介绍。

1993 年 1 月 31 日

---

① 辑录自钱学森给戴汝为的信件、讲话。

我近日收到《模式识别与人工智能》1994 年 1 期。其中有介绍您为主任的“汕头大学人工智能与模式识别开放实验室”，也有说明“模式识别国家重点实验室、智能机器人视觉开放研究实验室的基金申请办法”。因此我想到一个问题：

这一类研究是我们说的第二个时代的研究课题，而我们现在要开拓的是第三个时代——人机结合的大成智慧工程及大成智慧学。第二个时代的研究当然有用，但目前我们要宣传第三个时代人机结合的研究。换句话说我们要扩大视野，用人机结合来包括机器的模式识别和人工智能。

1994 年 4 月 10 日

而您和您的学生郝红卫又对人机结合的数码（手写）汉字识别系统有了突破！这一工作是您和您的学生在十年前的系统又一发展；那次是一次性系统，因而有些局限性，现在不同了，系统是不断学习适应手写人的！这打破了死机器的缺点！成了活的“大成智慧”！

我想这对形象思维的研究会有启发。形象思维不就是由人感受到的形象去搜索存储于大脑中的形象库，求能对号的形象吗？这不也是从一个新的“手写”的，去对一个已知的吗？当然也要用人机结合的网络集成！大有希望，可喜可贺！这一旦成功，大脑中形象库就大大扩展为计算机网络中的信息库，存量成百上千倍地增长，形象思维能力上升了，人机结合到“大成智慧”！

1995 年 4 月 20 日

……您和您的研究生写了一个关于艺术与科学的材料。我想就此说说我的看法。

那份杂志是 Roger Malina 送来的。所以我想先说说 Frank Malina 和 Roger Malina 的情况。

Frank Malina 是我在美国加州理工学院时很好的朋友，他也在航空系，好像是从东欧移民去美国的，很有想象力，也爱画点画儿。当时我们在那里搞航空器，搞火箭，都是他带的头。他有辆破汽车，常常在星期天带着我们几个单身汉到海边去晒太阳。早年美国政府并未注意到火箭问题，只有东部一所大学的物理系教授 Robert. H. Goddard 在 20 世纪 20 年代做过一些火箭试验，规模都很小。第二次世界大战中，德国人搞了两件战略武器，一个是 V-1 火箭，用的是冲压脉动式发动机带动一个小飞机，上面装一个炸弹；第二个战略武器是 V-2，这才算得上是火箭。因为德国的希特勒用 V-2 轰炸伦敦，这才引起西方，如美国、英国对火箭的注意。所以后来 Malina 它们想搞这个东西，开始是在航空系的一个旮旯儿里搞，后来系里说不行，你们搞的排气有污染。Malina 只好另找地方，找到加州理工学院北边的一个小山沟里，叫 Arroyo Seco，在这里做试验，这就是后来的 Jet Propultion Laboratary。美国

国防部后来也想搞火箭，给 von Karman 拍了个电报，问他那里能不能搞，如果能，就给他 100 万美元。Karman 开始把这份电报装在兜里，想了两天，才来征求我们的意见，问我们想不想搞。我们正愁没钱，当然说想搞；于是他才给国防部答复说，我这里有人，可以搞。这是美国真正搞火箭的开始，大积极分子是 Malina。

以上是说说 Malina 这个人的情况，由于他这样一个背景，所以他总想搞点科学与艺术结合方面的事。他办的这个《Learnado》刊物，是想把科学和艺术结合在一起。

你们知道，关于这个问题，我的观点是科学和艺术有关系，但不能说科学就等于艺术，艺术就等于科学，这是两回事。因为艺术主要是靠形象思维，而不是逻辑思维。艺术和科学的关系是，艺术离不开科学的支持，这包括两个方面：一方面是艺术工作所用的工具要靠科学，如画家画画儿用的颜料、油墨等要靠技术来制作，造纸也是一种技术，所以艺术要靠科学的支持。像电影、广播、电视都是新的科技成果，为艺术所利用。另一个方面是艺术家的创造必须对客观世界先有一个认识，而这个认识必须是科学的认识，正确的认识。最近文联开会，我看就是讲的这个问题。江总书记的讲话，第一条就是讲艺术的创造必须用马克思主义、毛泽东思想和邓小平建设有中国特色的社会主义理论作指导，讲的就是这个问题。这就是讲科学地认识客观世界，不然，他创作的东西就不能被人民群众所接受。这是我说的艺术与科学的关系。

再说科学和艺术的关系。科学的创造首先要有猜想，这个猜想就是艺术而不是科学。有了猜想，要做理论推导，又要做试验来验证，这些推导和验证就是科学，而不是艺术了。科学的推导和验证虽然是十分重要，但是没有开始的猜想也是不行的。归结起来说，艺术的思维是先科学后艺术，而科学的思维是先艺术后科学。这样的观点并不是说艺术和科学这两个范畴的东西完全可以捏在一起。

Malina 他们办的那份杂志好像有这个偏向，我认为那是不可能的，他们的说法有点牵强，是不妥当的。

至于联系到复杂巨系统的问题，我总是认为 Santa Fe 那些人有些勉强，它不像物理系统中的单元是不变的，可以用统计力学的办法处理。Santa Fe Institute 中的那些人硬是把复杂巨系统中的一些因素拉出来，好像他那套办法是普遍适用的，我想这是办不到的。在 Santa Fe Institute 中，我就欣赏诺贝尔奖获得者 Gell-Mann 那位老先生说的一句话："复杂事物中，猜想比什么都有用"。他所说的"猜想"，就是我们说的那些定性的东西，因为我们对复杂巨系统的认识有很大的局限性，像专家对社会经济系统的认识，他们的实践经验都有时间性的局限，是根据他一定时期的观察得出的看法，你要根据他的看法构筑模型，输入统计数据来算，那么你必须考虑到，社会经济系统是在发展变化的，因而你得到的结果是有时间局限的。你的模型用上一年、两年、四年、五年也许可以，但是时间再长可能就不合适，因为许多条件都

变了。由此我悟出巨系统用 Santa Fe 那些方法不行，他们的认识有点僵化，不实事求是。这也许跟他们是些物理学家和经典经济学家有关系。复杂巨系统的困难在于它是不断变化的，你掌握的仅是一个时期的情况，你这一套不能长期用下去，这跟物理学中的一些规律是不一样的。

所以，我的看法就是外国人不懂马克思主义，不实事求是。

1996 年 12 月 23 日

22 “人-机结合”的大成智慧[①]

22.1 控制论与控制系统的发展

当前，国内外关于系统科学与人工智能的研究表明，从传统的自动化向智能自动化发展是一种必然的趋势。智能自动化的核心问题可以包括两个方面：其一是在系统（或过程）中采用人工智能的原理与技术，使系统（或过程）“智能化”；其二是致力于在自动化领域中发展新的原理及技术来丰富有关智能的研究。当前人工智能的研究正处于一个转折期，把有关智能的研究划分为智能科学与智能工程是合适的。最近几年，我国的学者从实践中逐步认识与明确了在追求“智能化”时，应该利用并发挥人类和计算机各自的长处，人要与计算机共同操作采取“人机结合”的方针，才能使智能自动化沿着正确的途径发展。另外以人机结合的观点为根本，国内的学者已经提出来一些同发展智能科学与智能工程直接有关的主张与见解。如科学家钱学森提出并主张采用“从定性到定量的综合集成技术”把人的思维、思维的成果、人的知识、智慧以及各种情报、资料、信息统统集成起来，通过他所构思的“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”，致力于把今天世界上千百万人的聪明才智和已经不在世的古人的智慧都综合起来，形成一个工程领域，集中人类智慧的工作体。按中国文化的习惯，把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来叫作“集大成”。所以，他把该领域称为“大成智慧工程（met&synthetlc engineering)”。如果将这一工程进一步发展，在理论上提炼成一门学问，即大成智慧学。可以说，“大成智慧工程”是智能工程的一个重要组成部分，为发展智能工程提供了一条以“从定性到定量的综合集成方法”为核心的技术路线。为了对“大成智慧工程”的产生有所了解，我们首先从控制系统的发展谈起。

从第二次世界大战对科学技术的要求与影响而蓬勃发展起来的自动控制系统与控制论，在军事、工业及管理等方面已得到了广泛的应用，并渗透到工程技术、自然科学和社会科学的各个部门，这是工程背景很强的学科。提到这一学科，人们很自然地会联想到 20 世纪 50 年代《工程控制论》在我国出版后，所产生的巨大影响。早在 20 世纪 40 年代末、50 年代初我国科学家钱学森对第二次世界大战后迅速发展

① 戴汝为.“人-机结合”的大成智慧.模式识别与人工智能，1994，7(3)

起来的控制与制导工程技术进行了全面观察。他用比别人更敏锐的眼光去发现、提炼出指导控制与制导系统设计的普遍性概念、原理、理论和方法，从而发表了专著《工程控制论》。该书的第一版原是用英文写的，1954 年由麦克劳·希尔(McGraw-Hill)图书公司在美国出版。此后俄文版于 1956 年，德文版于 1957 年，中文版于 1958 年相继问世。当时此书几乎为所有自动控制方面的论文以突出的形式所引用。从一般意义上讲，《工程控制论》起到了奠定理论基础，并指出今后进一步研究方向的作用，它是自动控制学科中最具有远见卓识的科学预见的著作。值得强调的是，在这之后，自适应控制已大致形成，并把满足某种指标的控制问题，化成控制变量及系统状态变量在闭区域上变化的变分问题，建立了以极大值原理和动态规划为核心内容的最优控制。到了 1960 年美国科学家卡门(Kalman)对自动控制理论的发展作了一个基本总结，提出了“现代控制理论”。现代控制论的提出是与以下两件事紧密相关的：① 空间技术的需要；② 计算机技术的发展而导致对可适应数字计算机的数学模型需求——应该说现代控制理论是 1960 年至今的自动控制系统与理论获得进展的一个重要标志。现代控制理论曾经在运动物体的控制等一些领域中(突出的例子是空间技术)得到成功的应用。这一阶段中人们所追求的是研制不用人参与的、完全自动运行的所谓“自主系统”。这类系统在工作环境固定不变，即“干净环境(像空间环境)”中应用是成功的，这类系统属于简单系统的范畴。但在一些复杂环境中，就难以设计和研制能合乎要求的自主系统。这一段工作是发展历史的第一个时代。

有关系统的研究是从简单到复杂的。在现实的生产活动中，所面临的控制问题十分复杂，有的包含着多种物理与化学的过程，有的控制对象具有不确定性而且会发生突变等。复杂系统的控制问题已经提到了人们的面前。随着信息技术与高、新技术的发展及计算机的推广应用，在国民经济发展与国防建设中涉及全局性影响的系统往往朝着大型化和复杂化发展。关于什么是复杂系统，有各式各样的说法。我们认为具有复杂行为的系统，表现在系统的部件之间，或子系统之间有着很强的耦合作用，具有难以线性化的非线性性质，所以会出现极限环甚至混沌现象。另外，系统具有高度的不确定性. 要求具有实时性，而且难以用传统的方法来建立系统的数学模型。许多工业生产过程就是这种复杂系统的典型例子。另外，被控制对象本身虽然不复杂，但是对这种对象加以控制后所形成的系统是在复杂的环境之中运行的，由于环境的复杂而导致在这一环境中能够有效运行的系统也必然是复杂的。典型的例子是研制能为家庭生活服务的机器人。一个家庭这样的环境是很不规整的，因此家用机器人的控制也成为复杂系统的控制问题。这类问题用传统的控制理论与方法很难奏效。经过较长时期的孕育与发展，国内外已认识到把人工智能的原理与方法及人的经验与智能用于复杂系统的控制是解决复杂系统控制的主要途径，并开展了许多有意义的工作。例如在不了解对象动态特性的情况下，用“模糊控制”对

倒摆的控制就是一个成功的例子。这可以认为是发展的第二个阶段，把人的知识经验直接注入到控制系统中去。

在我国，人们正在致力于发展的第三个阶段，解决复杂系统的控制。钱学森等把系统的研究拓广到开放复杂巨系统的范畴①。他们对各式各样的系统进行分类，并分析所遇到的各种系统；概言之，不外乎自然系统以及人所制造出来的人工系统两大类。再进一步，根据组成系统的子系统种类的多少和它们之间产生关联关系和复杂程度又可以把自然系统和人工系统的种类再分为简单系统及巨系统两类，即：

(1) 简单系统。组成系统的子系统数量比较少，子系统之间的关系比较单纯。如一个温度控制系统就是一个人工简单系统。

(2) 巨系统。组成系统的子系统数量非常大，成亿、上百亿、千亿。如果系统中子系统的种类不太多，而且它们之间的关联关系又比较简单，则称为简单巨系统。如果子系统的种类很多，并且有层次结构，子系统之间的关系又很复杂，就称为复杂巨系统。如果系统又是开放的，开放是指系统与系统中的子系统分别与外界有各种信息交换，系统中的各子系统能够通过与周围环境的交互作用增加适应的能力，这种系统就称为开放复杂巨系统。例如生物体系统、人脑系统等。大多数的人造系统都是简单系统，如一般的控制系统或信息系统，而且不具有开放性。就是自动化工厂也只不过是人工的大系统而已。至于开放的复杂巨系统，这种系统无论在结构、功能、行为方面都很复杂，以至于到今天它的大多数性能我们还不清楚。

对系统进行分类后，在文献中提出了处理开放复杂巨系统的方法是“从定性到定量的综合集成法②”，并且阐明基于近代科学还原论的定量方法论的局限性，引用了德国著名物理学家普朗克的话：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体不是取决于事物的本身，而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学，通过生物学和人类学封社会学的连续链条，这是任何一处都不能被打断的链条”。应该说，20 世纪 90 年代初，开放的复杂系统及其方法论的提出是对系统科学发展的一大贡献。

总之，人们越来越认识到，以控制、决策系统及过程的控制为主要内容的自动化的进展与信息技术有着极为密切的关系。随着微电子、计算机及通讯网络的飞速发展，人类从事生产的劳动生产资料将发生极大的变化。信息资源、知识资源将在生产中占主导地位，这标志着现代社会生产已由工业化时代进入信息化时代。在这个时代中，人们已经掌握了大量的信息存储、快速信息处理等手段。当前又出现了原子测控技术的探索，使用这种技术，可成千上万倍地提高芯片的集成度与信息处理的速度。可以看出，在不远的将来就可在原子和分子水平上实现新的信息处理机

① 钱学森，于景元，戴汝为. 开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，1(1)

② 钱学森，于景元，戴汝为. 开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，1(1)

制，又加以多年来在控制理论与系统方法方面积累的大量科研成果，这就为极大地延伸自动化的范畴打下了基础，并自然地将其推向"人机结合"的智能自动化这一目标，进入第三个时代。

22.2　人工智能与知识系统的发展

与上述控制科学技术发展三个时代平行，我们要审视人们使用计算机模仿人的智能，即人工智能，也在演变。从科学的发展来看，20世纪40年代初在第二次世界大战对科学技术的要求与影响下，计算机科学、控制论、人工智能等蓬勃发展起来，机器智能研究的兴起可以说是这个时期的产物。在人工智能(AI)研究方面，Turing被后人尊为人工智能思想的奠基人。他的贡献在于对机器智能的描述，提出把基于离散量的递归函数作为智能描述的基础。另外，他提出了著名的"Turing实验"，给出了测试机器是否具有智能的基于行为主义的标准。早期的研究在用计算机证明数学定理，研制出具有学习功能的跳棋程序，把人工智能的研究结果用于解决困难的数学问题等方面取得了一些成就。这些成就使人备受鼓舞，以至于对人工智能的发展作了过分乐观的估计。1958年有的人工智能专家充满自信地预计：用不了10年，计算机将要成为世界象棋冠军；用不了10年，计算机将要发现和证明重要的数学定理；用不了10年，计算机将可以谱写出达到优秀作曲家水平的乐曲；用不了10年，在计算机上将形成大多数的心理学理论。甚至于还预测：按现在发展趋势，20世纪80年代将是全面实现人工智能的时代。到了2000年，机器的智能将会超过人了……然而人工智能研究的实践所给出的回答使人们的头脑冷静下来。实际的情况是从20世纪60年代到70年代，人工智能取得的成果远远达不到专家们的美好期望。但是在缓慢的进程中也结出了一些成果。其中，知识工程所取得的成就最使人工智能研究引以自豪。知识工程与通常人们所说的构建专家咨询系统，即以专家水平进行诊断与咨询的计算机软件，只是说法的不同。知识工程的历史是以1969年美国著名的科技专家Feigenbaum公布第一个专家系统DENDRAL开始的，进而他在1977年国际人工智能联合会议上综合与阐述了许多AI科技人员对AI研究的新观点，大体概括为①：知识工程师所实践的技术是把人工智能研究中产生的原理和工具用到需要专家知识解决的那些应用难题上。获取知识，表达知识，并适当地应用知识来构造和说明推理路线等技术问题，是知识库系统设计中的一些重要问题。构造智能媒介这种技术是程序设计技术的一部分，也是它的扩充，用大量的知识来表达和推理也是制造复杂的计算机程序的技术；即改变了以往认为几个推理定律再加上强大的计算机就会产生专家和超人的性能这一起主导作用的信念，人们认识到

---

①　弗.赫依斯-罗斯等专家系统建造.山西人民出版社，1986

用以往所遵循的“通用的求解策略”这一能力有限的方法来解决很复杂的问题实在是难以达到目的，需要转向狭隘定义的应用问题。专家系统就是研究利用针对某个专门问题的专家知识建立人机系统的方法和技术来进行问题求解。专家的能力涉及专家两个方面的知识，即公开的知识和个人所掌握的经验性的知识。公开的知识包括事实和专业中的理论等，这种知识往往记录在教科书和参考书中；专家所掌握的知识指的是专家通过实践获得的经验知识，称为启发式(heuristic)知识。这种知识是专家区别于非专家的标志所在，能使专家在必要时作出猜测，辨别有希望的解决途径，并能有效地处理错误或不完全的数据。可以说专家经验性的知识是专家能力的关键所在，专家系统或知识系统的威力是从它所处理的知识中产生的。由于把着重点放在解决狭隘定义的应用问题，科技人员研制开发了大量的、各式各样的专家系统和决策系统。在国内，这门工程技术近 10 年才发展起来，已经取得了较大进展。

近年来有关智能模拟的研究，还取得了一些成果。例如令人瞩目的构建能战胜(或势均力敌)国际象棋特级大师的软硬件系统终于获得初步成功，由 IBM 的 RISC/6000 系统控制 4 个特制的硬件而构成的系统 Deep Thought 2，速度可达每秒钟选择 800 万个棋子位置。该系统于 1991 年在悉尼举行的第 12 届国际人工智能会议期间与澳大利亚冠军 Danayl Johnsen 进行比赛，经过一个下午的较量，以 1:1 的平局告终。这些工作为今后进行机器智能的研究与付诸实际应用起到积极的作用。

总之，人们在人工智能(AI)的旗帜下满怀希望地奋斗了多年，由于历史的局限及对问题的困难程度估计不足，使人工智能 30 多年的研究历史充满着曲折。

虽然专家系统的研究获得了成功，但 20 世纪 80 年代后期的一系列事件又强烈地冲击了 AI 研究者辛辛苦苦建立起来的体系，例如，在人工神经网络的研究方面，由于反向传播网络的成功，使 AI 的研究者不得不承认，人工神经网络及大规模并行处理技术对于模拟人类的“感知”，是一条有效的途径。实际上联接机制网络是描述智能行为的另一类重要理论基础。在知识工程的兴起并获得成功的情况下，日本的有关人士又对“知识信息处理系统”作了过分乐观的估计与期望，制订与实施了第五代计算机计划。日本第五代计算机的研制未达到预期效果是对传统的 AI 又一次冲击。在这种背景下，使得国内外的 AI 研究者不得不从动机、理论及实践等诸方面，对传统的人工智能研究进行反思。通过对目标、方法论、路线等的重新思考，汲取经验教训，由此为人工智能的进一步发展扫清了障碍，明确了方向。

以专家系统作为代表的知识系统与上一节所说的控制系统，虽然都是系统，但有所不同。知识系统概而言之，是一种包括符号表示、符号推理及启发式搜索的计算机程序。知识系统设计中强调的不是控制系统中所关注的“动态性能”等，它所面临的是“结构不良”的问题，它的特点是在对一个问题的统计特性知之甚少的情况

下，也能利用一些规则，通过启发式的搜索而获得某些结果。这样的处理在控制系统中是难以完成的。

前面两节我们花了不少篇幅讨论控制系统及知识系统，这两种不同类型的系统是分别从不同的领域中逐渐发展和成熟起来的，两者的特点大不相同。我们讨论这两类系统及其发展的历史，可以概括出如下的看法：① 今后为推进智能自动化，需要研究的是复杂系统、巨型系统及智能系统，这些系统往往包含或牵涉到这两类系统，可以说以往的控制系统与知识系统是基础。② 从学科的发展考虑，系统科学与人工智能的研究互相借鉴，找到一个共同点，把两者加以沟通看来也是势在必行，有利于开拓新的领域。

从控制论到人工智能的研究，都为今后智能自动化的发展作出了贡献。1949年《控制论》一书问世时，把这门科学解释为"动物和机器中控制和通讯的科学"，而当时有关通讯的统计理论已经或正在建立。该书的作者维纳曾经指出[①]：通讯工程的机器，根据单独一次输入而产生的动作是不会使人感到兴趣的。这种机器如果要能充分发挥作用，它就必须对全部输入都做出满意的动作。这也就是说，对一类统计上预期要收到的输入做出统计上令人满意的动作，它的理论应该属于吉布统计力学的范畴"。并还说过"在变化很多的条件下的长久统计游程的益处是有名无实的"。人们可以认为，控制论的研究所能有效处理的问题是基于对象与环境的统计性质，换句话说，控制论的理论基础是建立在对象与环境具有较好的统计性质这一假设上。这个要求是十分自然且合理的，而且它也成功地应用到一些简单系统之中，如线性随机系统中的噪声过滤，应该说，直到今天，对象与环境的统计性质的好坏对系统成功与否还是起着举足轻重的作用。但在一些重要的领域，例如经济决策、军事决策甚至医疗诊断中，这个要求就太高且不合理了，这也正是人工智能产生及发展的重要原因之一。

人工智能中的知识工程，从开始之时，就已经认识到个人所掌握的知识在问题求解中的重要作用，尽管这些个人的知识同样来自对世界的观察。但由于这种观察往往受到种种限制，因此其数量不可能达到统计学所规定的长久统计游程的要求。例如，军事战术的决策者，就不可能使用稳定的统计指标来指挥战役。从专家系统及决策支持系统的设计来看，所采用的是规则与启发式搜索，没有利用统计性质。这种决策不是使用统计模型来概括的。因此，以往不能处理的一些比较复杂的难以进行统计的系统问题，可以用专家系统的办法加以解决，这是一种进步。在近半个世纪的自动化研究中，以假设可进行统计及难以进行统计（统计游程很短）为基本点，分成两种不同的类型。

近几年这些情况发生了根本性的变化，研究中假设的改变是主要原因。人们现

① 诺·维纳. 控制论（或关于在动物和机器中控制和通讯的科学）. 北京：科学出版社，1962

在认识到，人的思维是对实际世界的适应，因此在世界上既然存在可统计与难以统计两种不同的现象，因此任一种单纯的模型将仅仅说明了事物的一个方面。这样在问题求解中，具有统计性质的模型是与具有非统计性质的模型互补作用下协同工作的。这种协同所产生的效果已为实践所证明是十分有效的。人工神经网络(统计模型)与物理符号系统(非统计模型)的互补就是一个好的例子。这种有机的结合就可能形成新的思维模型。

对象与环境不具有统计性质的研究事实上是十分困难的，一方面从直观上看对其直接建模将是非常复杂的，完整且精确地建模一般说是不可能的(对实际世界而言，而不是对数学世界而言)；另一方面人是进化的，任何人建立起来的模型均落后于人的进化过程，这是本文提出人机一体作为智能系统研究方向的原因之一。下面我们将仔细地讨论智能系统研制中的人机结合这一极其重要的观点。

22.3 “人-机结合”的智能系统

当前，对于研制智能系统应该采取“人机结合”的方针，看来已经为大家所接受。但是人们认识与接受这一方针是花了相当多的精力与时间的。前面已经提到过，以往人工智能(AI)研究的先驱者们对于 AI 所取得的成就及前景作过一些过于乐观的评述。常言道，当局者迷旁观者清，哲学家休伯特·德雷福斯(Hubert L. Dreyfus)在 1979 年的《计算机不能做什么》一书(副标题是“人工智能的极限[①]”)中，提出了一些重要的和带有根本性的问题。他看到所有的人工智能基础研究进展都十分缓慢，他把这种进展缓慢看作是存在着不可逾越障碍的标志，而不是那种为克服困难取得成功之路上所应付出的正常代价。德雷福斯把智能活动分成四类，第一类是刺激-反应，这是心理学家最熟悉的领域，其中包括意义与上下文环境，同有关活动无关的、各种形式的初级联想型行为。第二类是帕斯卡的数学思维领域，它由概念世界而不是感知世界构成，问题完全形式化了，并完全可以计算。第三类是原则上可形式化而实际上无法驾驭的行为，称为复杂一形式化系统，包括那些实际上不能用穷举算法(象棋、围棋等)处理的，因而需要启发式程序的系统。第四类是那些非形式化的行为领域，包括有规律但无规则支持的、我们人类所有的日常活动。在该书最后一节，标题是人工智能的未来，提出了人与机器相结合的观点，他谈到以前巴希莱尔、奥·格尔和约翰·皮尔斯他们都主张采用可使计算机与人共生的系统，并强调了罗森布里斯在 1962 年一次学术会议上的观点“人同计算机一起能够完成谁也单独无法完成的事”。此外德雷福斯在《计算机不能做什么》一书中前言中还提到，他发表第一次调查研究人工智能工作成果之后的第二年，兰德公司召集了一次计算机

① 休·德雷福斯. 计算机不能做什么. 北京：生活·读书·新知三联书店，1986

专家会议，当时在IBM公司工作的利克利德尔(LC. R. LicMider)博士想要为德雷福斯关于人机合作的观点辩护时，遭到AI专家、MIT的帕波特的责难。该书的中文译文于1985年出版，校者是马希文，看来他已经看出人机共生的重要性。他在校者的话中写到："从应用上来看谈论人脑与计算机的彼此替代未免空泛、消极，不如研究使两者取长补短的人机共生系统。这样做，不只有实用意义，而且对于我们对思维的认识、对信息处理在思维中地位的认识将提供许多有启发性的实验资料"。后来一位计算心理学家玛格丽特·波登(Margaret Boudou)从不同于德福雷斯观点的另一角度来评价AI的成就[①]，她认为："AI的主要成就在于明确地促使我们鉴赏到人的心智(human mind)是极其巨大、丰富与难以捉摸的。人们可以通过AI的途径来了解人的心智的某些方面。例如人的创造性的某些方面可以通过建立有关创造性的计算机模型开始加以了解"。如果说德雷福斯消极的看出用计算机来实现AI的局限，那么波登则是从积极方面看到人的意识作用，而且她的看法说明在心理学和AI之间相互有所反馈，是比较辩证的。她的见解是对人-机结合观点的支持。

1988年6月28日，由国家高新技术863计划"智能计算机系统"主题专家组建议，在国防科工委系统所举行"智能计算机理论讨论会"上，马希文谈对于智能计算机的看法时，又再次提到人机共生系统。在这次会议上，通过与会者的发言，对人机结合的论点阐述得比较充分。参加了这次会议的钱学森后来多次提到马的那次发言。马希文所谓的"人机共生"当时还局限于人机通讯的层次上，但他对后来形成系统的"人机结合"的论点是有贡献的。他于1989年赴美，以后没有再参加国内对此有关问题的研讨。

钱学森早在20世纪80年代初就对处理复杂行为系统的定量方法作了概括，认为是半经验半理论的，提出经验性假设(猜想或判断)，是建立复杂行为系统数学模型的出发点。这些经验性假设(猜想或判断)，不能用严谨的科学方式证明，但需要用经验性数据对其确实性进行检测。从经验性假设(猜想或判断)出发，通过定量方法途径获得结论，仍然具有半经验、半理论的属性，强调了人的重要性及来源于人的聪明才智与实践活动经验的重要性。20世纪80年代末，他进一步从社会经济系统、人体系统和地理系统的研究与实践的基础上，分析了以往习以为常的科学研究的还原论方法论的局限性，从而提炼出"开放复杂巨系统"的设想及其方法论，提出处理开放复杂巨系统的方法是"从定性到定量的综合集成方法"，这种综合集成的构思来源于实践论。他在一封信中曾讲到："人从实践经验的总结先在大脑中形成感性认识，那是点滴零碎的，然后再进一步分析综合，运用过去积累的知识加工成理性认识。但这一过程是一次认识的循环，还要把得到的理性认识运用于实践，开始第二个循环，……无穷无尽"。这一构思和现代信息技术的成就相结合的结果产生了综

① M. Boden. The Mind of a Very Special Machine? New Scientist, 18 January 1992

合集成法,其实质就是将专家群体、数据和各种信息与计算机技术有机地结合起来,这三者本身也构成一个系统。这种方法的应用就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势。谈到整体优势,使人想起恩格斯曾经引用过拿破仑关于法国兵与马木留克兵双方战斗力相比较的生动例子:两个马木留克兵绝对打败三个法国兵,100 个马木留克兵与 100 个法国兵,打起来可以打个平手,而 1000 个法国兵可以打败1 500 个马木留克兵,原因何在呢?原因在于法国兵在协调配合方面高过一筹,因而能有效的发挥他们的综合优势。从定性到定量的综合集成技术充分发挥与体现了人机结合的思想,在综合集成的过程中人始终起着主导的作用。另外关于专家在错综复杂的情况下的判断,提出的假设以及专家的某些"点子"是专家经验积累而形成的知识,是人的"心智"的一种体现。我们可以认为综合集成是人用计算机的软、硬件来综合专家群体的定性认识及大量专家系统所提供的结论及各种数据与信息,经过加工处理从而上升为对总体的定量的认识。综合集成的过程是相当复杂的,即使掌握了大量的定性认识,并不是通过几个步骤,几次处理就能达到对全局的定量认识。因为复杂的、智能型的问题往往是被称之为结构不良的问题(ill structured problem),也就是说目标、任务范围、计算机允许的操作都不是有明确的定义,需要一种有反馈的过程来加以解决。结构不良的另外一种含义是针对被解决的问题而言的,所具有的知识是不完备或不一致的,例如对于同一个问题,两个专家的看法可能完全不同,发生了矛盾,这就必须靠人参与解决。另一方面当然也要发挥计算机快速处理的本领,形成人机结合的智能系统。关于人机结合的智能系统,钱学森在 1991 年 4 月 18 日与他指导的科研集体中的部分成员做过如下一次总结性的谈话:"智能机是非常重要的,是国家大事,关系到 21 世纪我们国家的地位。如果在这个问题上有所突破,将有深远的影响。我们要研究的问题不是智能机,而是人与机器相结合的智能系统。不能把人排除在外,是一个人机智能系统。谈话的内容还包括以下三点:

(1) 人的意识活动是很丰富的,包括自觉的意识、下意识,人是靠这些来认识世界的。

(2) 为认识世界和改造世界,人始终发挥着主导作用,我们要研究的是人和机器相结合的智能系统。

(3) 现在还不可能很快实现这种人机智能系统,目前只能做些"妥协",实事求是,尽量开拓当前计算机的科学技术,使计算机尽可能地多帮助人来做些工作。

这是一次重要的谈话,对人工智能及智能计算机以及其他科技领域的研究具有方向性的、极其深远的意义。

现在我们可以对人机结合的观点扼要地加以总结:在研制智能系统时,应强调的是人类的"心智"与机器的智能相结合。从体系上讲,在系统的设计过程中,把人作为成员综合到整个系统中去,充分利用并发挥人类和计算机各自的长处形成新的

体系是今后深入研究的问题。这里引用 Lenat 和 Feigenbaum 的话：在知识系统的"第二个纪元"中"系统"将使智能计算机与智能人之间形成一种同事关系，人和计算机各自完成自己最擅长的任务，系统的智能是这种合作的产物。人与计算机的这种合作可能达到天衣无缝并极其自然，以至于技能、知识及想法是在人脑中还是在计算机的知识结构中都是没有什么关系的，断定智能在程序之中是不准确的。从这样的人机系统中将出现超人的智能和能力。这段话充分表明了人机结合的前景。另外"人作为智能系统成员"的论点，也包括两个层次，即界面与体系两方面的含义。人机界面是实现上述论点的必要条件。这里所说的人机界面，其含义不同于那种基于图形学的人机界面，而是包含了模式识别这类涉及感知方面问题的更广义的人机界面。目前这方面的工作是十分活跃的，有代表性的研究有两类：① 多媒体技术；②" 临境 (virtual realty)"技术。根据美国麻省理工学院媒体实验室的规划，媒体包括以下三个部分：① 学习与常识；② 感知计算；③ 信息与娱乐。我们可以看出 MIT 对媒体的论述是与模拟人类的智能行为紧密相关的，换句话说，就是将人机通讯的过程同样理解为一种智能行为，这是十分引人注目的。关于"临境"技术，目前还不够成熟，其思想是力求人在求解问题的过程中使其有身临其境之感。临境技术使人的感觉大大拓宽，小至分子大至宇宙都可如同亲临其境，将使人的感觉及认知来一次飞跃。

22.4　人机结合的大成智慧

前面已经提到，20 世纪 90 年代初由于系统工程的发展，开放的复杂巨系统这一新的科学领域开始引起人们的关注，为解决开放的复杂巨系统的问题，钱学森总结和提出了"从定性到定量的综合集成法"。由于人脑也属于开放复杂巨系统的范畴，而人类的"心智"来自人脑，所以开放复杂巨系统的研究与人工智能的研究有着十分密切的联系。1993 年国内学者参与对人工智能 30 多年来的研究进行反思后，在文献中把从定性到定量的综合集成法用于人工智能的研究，提出了"智能系统的综合集成[①]"的研究发展方向，致力于把系统科学的研究与人工智能的研究加以沟通。总之，综合集成法的提出是方法论上的一个飞跃。我国有"集大成"的说法，就是说把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来，集其大成。采用上述综合集成法(metasynthesis)，就可能把人的思维、思维的成果、人的知识、智慧以及各种情报、资料、信息统统集成起来，达到集大成，这是一个认识上的飞跃。顾名思义，称为"大成智慧工程 (metasynthetic engineering)"。紧接着，钱学森于 1992 年 3 月，进一步提出"从定性到定量综合集成研讨厅体系(hall for workshopof metasynthetIc engi-

① 戴汝为，王珏. 关于智能系统的综合集成. 科学通报，1993，38(14)

neerlng)"。他的构思是把今天世界上千百万人的聪明才智和已经不在世的古人的智慧都综合起来。我们体会到研讨厅体系体现了它的构思者在长期的科研实践过程中受益于"讨论班(workshop)"的心得与经验(有好的学术带头人,能充分发扬学术民主,不论职位高低均能参与讨论,无保留地放开思想,与众交流,知错就公开宣布改正,培养人们在众多尖锐质问下,于短暂瞬间阐明自己观点的能力,有这样的学术环境,才能称为讨论班),及对当代计算机软硬件环境的重要意义的了解。同时研讨厅体系还体现了它的构思者把自然科学、社会科学与哲学三者相结合,所形成的观点。说得确切一些,研讨厅体系中的人并不是未加训练过的老百姓,而应该是根据我国发展尖端技术的经验,如同曾经培养出来的那种具有高度的革命觉悟,高度的组织纪律性,高度的科学性的人。

应该强调的是从定性到定量的综合集成研讨厅体系的设想,一方面是在系统中把以往只能体现出"个体"的经验知识上升为能体现出"群体"的经验知识。另一方面是用语言和符号表达连接起来的知识体系来提高人的意识,并把意识提高到思维。最近,国外心理学家重新发掘出 20 世纪 30 年代被埋没的前苏联心理学家 Lev Vygotsky 的学说[①],该学说认为语言在人意识中起着中心作用,研讨厅体系可以说是这一思想的进一步发展。

作者与王珏曾经对当前国内外已经形成或即将形成的巨型智能系统进行了探讨[②],把"从定性到定量的综合集成研讨厅体系"归之为一类巨型智能系统,这样就便于与当前国际上的一些巨型智能系统相比较,概括出一个研究巨型智能系统方案的系列。这个系列从系统设计策略(研制过程)与系统结构(问题求解过程)两个方面将巨型智能系统研究方案划分为四种类型:① 封闭巨型智能系统;② 半封闭巨型智能系统;③ 半开放巨型智能系统;④ 开放巨型智能系统。从中论述了"从定性到定量的综合集成研讨厅体系"属于第 4 种类型,它充分体现了人机的结合。

如果将大成智慧工程进一步发展,在理论上提炼成一门学问,就是"大成智慧学"。我国哲学家熊十力曾经提出过这样的观点[③],即人的智慧有两个方面:文化艺术方面的智慧叫"性智";科学技术方面的智慧叫"量智"。有的伟大人物的智慧基本上来源于实践与中国传统文化艺术,并非来源于科学技术,总之,人一方面要有文化艺术修养,另一方面要有科学技术知识,这样才可能成为既有"性智"又有"量智"的人。在今后的社会中,高速信息网的作用是极其巨大的,据报道美国已在筹划建立"信息高速公路 (informatiou high way)",把计算机链接起来形成网络,实现计算机与计算机之间的通讯,许多发达国家也纷纷紧跟着采取行动。实现了计算机联网

---

① J. Mecrone. Inner Voices Distant Memories, New Scientist, 29 January 1994

② 戴汝为,王珏. 关于巨型智能系统的探讨. 自动化学报,1993,19(6)

③ 郑家栋. 熊十力哲学方法论析. 吉林大学社会科学学报,1992,4

后，人每时每刻都能获得大量信息与知识，这就大大的有利于培养人的“性智”与“量智”，使后代人变得比现在的人更为聪明。总之在信息社会中，借助信息网络，有了从定性到定量的综合集成体系，就能“人机结合”来达到集智慧之大成。

22.5　小结

通过上述讨论与分析，我们得出以下的看法：从第二次世界大战到 20 世纪 50 年代这一阶段，由于战争的需要，人们研制成功各种系统，而这些系统实际上是比较简单的系统，系统所运行的环境也不复杂，在这些工作的基础上形成了“控制论”的时代，其特点是系统比较简单。随着系统研究的进一步发展，人们面临着的不仅仅是简单系统而是越来越复杂的系统，需要用人的经验知识，由此而发展起来的专家系统，相对而言能够解决比较具体的、复杂的问题。从 20 世纪 50 年代至 90 年代这一阶段可以说是“人工智能”的时代，其特点是专家经验知识的利用。但这 40 多年的历程是艰苦而曲折的，人们曾经有过许多美好的期望，但主导思想存在问题，达不到预期的目的。人们面对着复杂系统、巨型系统及智能系统的挑战，应该采取什么样的对策呢？经国内外科技工作者多年努力与实践，找到了答案。答案是把人的心智(human mind)与机器的智能两者结合起来，发展人机结合的系统。在我国已经把人机结合的观点发展成为从定性到定量的综合集成研讨厅体系的设想。这一设想是辩证的，人利用计算机的软硬件系统来帮助完成一些工作，另外以计算机为支撑，用语言和符号表达连接起来的知识体系(包括信息网络)反过来提高人的意识与思维，从而达到大成智慧。这对系统与智能的研究来说，是一个带有根本性的转折，从此进入“人机结合的大成智慧”的新时代，这一时代的特点是群体专家知识的利用，开辟了集智慧之大成的道路。

23 智能科学与工程(人-机的结合)[①]

物质的本质,宇宙的起源,生命的本质及智能的呈现是人类关注的四大基本问题。智能科学正是研究这四大问题中的最后一个,即智能的呈现问题,由此形成了具有高度挑战性的科学技术领域。以往人们在人工智能(AI)的旗帜下奋斗了多年,积累了经验,汲取了教训。关于人工智能究竟是属于科学还是属于技术,或者是介于两者之间的学科,一直存在着争论。认为人工智能属于什么范畴,这与研究人员想实现的目的与任务有关,大多数研究人员认为人工智能是介于科学与技术之间的一个学科。

23.1 智能科学与工程的发展前景

当前人工智能正处于一个转折时期,把有关智能的研究划分为智能科学与智能工程是合适的,这有利于促进这门新兴学科的深入研究,并在此基础上发展应用前景十分广阔的智能工程,当前时机已经成熟,这可以从以下几方面看出:

(1) 随着微电子,计算机及通讯网络的飞速发展,人类从事生产的劳动生产资料将有极大的变化。信息资源,知识资源将在生产中占主导地位,标志着现代社会生产已由工业化时代进入信息化时代。在这个时代中人们已经掌握了大量的信息存储、快速信息处理等手段。当前又出现原子测控技术的探索,用这种技术,可成千上万倍地提高芯片的集成度与运行的速度。可以看出,在不远的将来就可在原子和分子水平上实现新的信息处理机制,这就极大地延伸了自动化的范畴。从用机器代替人的体力劳动,进入用计算机代替脑力劳动的部分职能,实质上,把系统、控制与智能三者综合为一个整体,并为进一步研究用计算机模拟思维与智能(智能科学的主要任务之一),为实现人工智能提供了必要的物质条件。

(2) 从科学的发展来看,20 世纪 40 年代初在第二次世界大战的要求与影响下,计算机科学、控制论、人工智能等蓬勃发展起来,机器智能研究的兴起可以说是这个时期的产物,至少已结出了一些丰硕的成果,如知识工程的形成,为今后进行机器智能的研究与付诸实际应用打下了基础,这是问题的一个方面。另一方面,由于历史

① 戴汝为.智能科学与工程(人-机的结合).中国科学院第七次院士大会报告摘要汇编(预印本),1994

的局限，以及对问题的困难程度估计不足，人工智能（AI）30多年的历史表明，AI的道路是曲折的。20世纪80年代后期的一系列事件强烈地冲击了AI研究者辛辛苦苦建立起来的体系。例如，在人工神经网络的研究方面，由于反向传播网络的成功，使AI的研究者不得不承认，联接机制网络是描述智能行为的另一类重要理论基础。日本第五代计算机的研制未达到预期效果是对传统AI的又一次冲击，这表明传统AI研究所基于的理论和方法不能取得人们预期的结果。人们从实践中开始认识到，利用并发挥人类和计算机各自的长处，把人和计算机相结合才是正确的追求的目标。在这种背景下，使得国内外的研究者不得不从动机、理论及实践等诸方面，对传统的人工智能研究进行反思。在这一过程中国内的一些专家学者们，通过对开放复杂巨系统的研究认识到：处理开放复杂巨系统及智能系统这样复杂的系统，应该突破以往习以为常的还原方法论的束缚，采用整体论与还原论相结合的方法论作为指导。通过对目标、方法论、路线等的思考，汲取经验教训，这就为智能科学的建立起到扫清道路，明确方向的作用。

（3）最近几年，我国的科学家已经提出来一些同发展智能科学与智能工程直接有关的主张与见解。如钱学森主张采用“从定性到定量的综合集成技术”，把人的思维、思维的成果、人的知识、智慧以及各种情报、资料、信息统统集成起来，通过他所构思的“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”，致力于把今天世界上千百万人的聪明才智和已经不在世的古人的智慧都综合起来形成一个工程领域，按中国文化的习惯，把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来叫做“集大成”。所以把该领域称为“大成智慧工程（metasyntactic engineering）”。如果将这一工程进一步发展，在理论上提炼成一门学问，就成为“大成智慧学”。可以说“大成智慧工程”是智能工程的一个重要组成部分，为发展智能工程提供了一条以从定性到定量的综合集成方法为核心的技术路线。至于“大成智慧学”则从不同于脑科学及心理学的角度，对智能科学的建立起一定的指导作用。

（4）当前的信息社会中，信息技术是立国之本。信息技术再进一步发展，则成为以“智能”为核心的技术。例如海湾战争所显示出来的智能化的高、新技术在战争中的作用就很说明问题。国内外有识之士已经了解到今后智能技术将会覆盖几乎所有主要工程技术领域。实际上，根据对智能技术的需求程度，可以将智能工程分为两类：一类是所需研究解决的问题的核心就是智能行为的模拟；另一类则是所需解决的问题中的某个部分采用已有的智能技术后会有改善或效果显著。总之也就是说智能工程所提供的一些设计构思、技术措施、实现途径等都可以为各工程领域加以借鉴、仿效。

智能科学与工程强调人类的“心智”与机器的“智能”相结合，追求的是人与机器相结合的智能系统，从体系上讲，人作为一个成员，综合到整个系统中去，利用并发挥人类和计算机各自的长处，把人和计算机结合起来形成新的体系。强调人在未来

智能系统中的作用，是对传统人工智能研究，也是对传统自动化研究目标的革命，这将带来一系列在研究方向及研究课题上的变革。另外“人作为智能系统成员”的论点，也包括两个层次，即界面与体系两方面的含义。人机界面是实现上述论点的必要条件。这里所说的人机界面，其含义不同于那种基于图形学的人机界面，而是包含了模式识别这类涉及感知方面问题的更广义的人机界面。目前这方面的工作是十分活跃的，有代表性的研究有两类：① 多媒体技术；② “灵境(virtual reality)”技术。根据美国麻省理工学院多媒体实验室的规划，多媒体包括以下三分部分：① 学习与常识；② 感知计算；③ 信息与娱乐。我们可以看出 MIT 对于多媒体的论述是与模拟人类的智能行为紧密相关，换句话说，就是将人机通讯的过程同样理解为一种智能行为，这是十分引人注目的。关于“灵境”技术，目前还不够成熟，其思想是力求人在求解问题的过程中使其有身临其境之感。“灵境”技术使人的感觉大大拓宽，小至分子大至宇宙都可如同亲临其境，将使人的感觉及认知来一次飞跃。

展望未来，随着智能技术的飞速发展，如果人离开了计算机终端(或随身携带的小型计算装置)及通信网络，看来是难以工作与生活。可以这样说，人类实际上将与计算机及通信网结合在一起，以一种全新的方式生存下去。

23.2 发展智能工程的设想

23.2.1 任务

(1) 构建各种实用的智能系统。

(2) 研制各种智能系统的开发工具。

一般说，可以根据实际工程问题对智能技术的需求程度将智能工程分为两类：一类是这些工程问题需要研究及解决的核心问题就是智能行为的模拟，例如国家图书馆及国家知识库这样的问题。它的目的就是使专家的知识可以共享，因此这类工程问题本身就是对智能行为的模拟。另外一类则是一些工程问题中的某个局部需要使用智能技术来解决，智能技术的引入将会改善这些设施的性能品质，例如家用电器材，引入智能技术可以改善设施的品质。

以上这两类工程问题对智能技术的要求是完全不同的，前者对智能研究自身提出了全新的要求，例如，在建立国家知识库的过程，如果在这个知识库中存在不一致(这是必然发生的事情)，如何解决，这对人工智能研究来说，还是当前的一个研究课题，但对实施国家知识库却是一项工程，其中包括通讯网络，巨型知识库系统等等。对于后者，则强调使用成熟的智能技术，首先把智能技术合理地使用到这些工程问题之上，然后再去研究由此导致的问题，例如智能控制，它可以使用智能技术去解决对象统计性质知之甚少的问题，动态特性难以表达与辨识问题的核心不是智能技术

自身。

23.2.2　技术路线

根据国民经济及国防中的需求，利用智能科学中的成果开发新的实用化的产品。智能工程有关的工程技术领域

(1) 巨型知识库系统：如包括描述一般性知识的规则为千万条的知识库系统，以及由多个知识库组成并能进行知识分享的巨型系统。

(2) 知识工程：研制符合于实际需要的能以专家的水平进行的专家系统，以及各种决策支持系统与开发工具。

(3) 识别工程：以模式识别为核心的分类系统，如目标识别、文本处理、图像理解等系统。尤其以具有我国特色的汉字识别与汉语语音识别系统，对于在我国推广应用计算机，发展“笔式电脑”等起着关键性作用。

(4) 灵境(virtual reality)与多媒体工程：发展声、图、文一体化的通讯，信息压缩，计算机帮助人的“实境(enhanced reality)”以及人进入计算机软硬件环境的灵境及其在医疗方面应用。

(5) 其他采用智能技术的各种工程。

23.2.3　智能科学学科的初步设想

(一) 研究任务

(1) 了解人的心智。

(2) 模拟思维与智能。

(3) 建立人机结合(人机一体化)的系统的理论。

(二) 方法论

(1) 克服近代科学还原论方法论的束缚。

(2) 以整体论和还原相结合，作为学术方面主导思想。

(3) 采用从定性到定量的综合集成法，以人机结合为指导方针把各方面有关专家的知识及才能，各种类型的信息及数据与计算机的软件三者有机地结合起来，构成一个系统，发挥系统的整体优势和综合优势。

24 大成智慧工程[①]

24.1 提高思维能力的途径

人类，尤其是在现代社会中，面临着的四大基本问题是：物质的本质，宇宙的起源，生命的本质及智能的涌现。长期以来国内外的科学家们一直锲而不舍地从不同的角度与不同的途径来研究这些问题。这里所说的智能的涌现，英文为"emergence of intelligence"。"intelligence"一词在中国内地译为"智能"，在台湾译为"智慧"，要给出一个确切的和中、外均能接受的定义是很不容易的。但自古至今，人们对"智慧"和与之有紧密联系的"思维"、以及与之有关的问题都进行过研究或正在研究；因为提高人的"智慧"或提高人的"思维能力"对人类是至关重要的大事。

20 世纪中期，由于电子数字计算机的问世，信息技术得到了突飞猛进的发展；信息的存储、传输、处理及应用等成为大家十分关注的问题。人们开始并已经认识到，数字计算机是一个处理信息的装置，而人脑也同样是一个信息处理的系统；这一认识的提高对基础科学的研究与发展是一个飞跃。1956 年，美国的一批科学家在 Dartmouth 会议上有了共识并提出了新的学科"人工智能"，也就是利用计算机来模拟和实现人脑的部分职能。由于计算机科学发展的突飞猛进，到了 20 世纪 80 年代，第五代计算机、高性能计算机、智能计算机的研究计划纷纷出台，人们对人工智能的研究达到高潮。

正值此时，欣逢我国改革开放的大好形势，我国科学家钱学森的科学思想极其活跃。他认为："现代科学是一个完整的系统，或者是一个完整的体系，要有一个完整的认识(1983.6.12)"；"西方与东方科学思想的结合是奥妙无穷的。我们要的是西方与东方科学思想的结合(1984.3.26)"；我们所提倡的系统论，既不是整体论，也非还原论，而是整体论与还原论的辩证统一。这段时期，钱学森发表了大量开创性的、前瞻性的重要文章：如"自然辩证法，思维科学和人的潜力"[②]，"系统科学、思维科

① 戴汝为. 钱学森论"大成智慧工程". 中国工程科学，2001，3(2)

② 钱学森. 自然辩证法. 思维科学和人的潜力. 哲学研究，1980，4

学和人体科学”[①],“关于思维科学”[②]等。他高瞻远瞩,提出了几个新的“科学部门”,并以系统论的观点构建“现代科学技术体系”。可见他的系统科学的思想,科学技术体系的思想,人体科学研究思想以及思维科学研究思想,均得到了充分发展,并达到了理论成熟时期。由于他在美国加州理工学院时期深感科学民主的重要意义,并深深得益于“讨论班(seminar)”的学术活动方式,20 世纪 80 年代初,钱学森在北京组织了三个讨论班:系统学讨论班、人体科学讨论班以及思维科学讨论班。他总是亲自参加讨论,每次听完别人的报告后还作系统的发言,发表自己的看法和见解。“人体科学讨论班”从 1983 年至 1987 年长达 4 年之久;“系统学讨论班”的时间更长;“思维科学讨论班”的活动时间相对较短。

1986 年在国家“863 计划”的信息领域设立了“智能计算机”主题项目,在此之前钱学森提出创建“思维科学”的主张。他认为,人工智能和智能计算机的基础是“思维科学”。当前思维科学研究的突破口在于“形象思维”研究的突破;思维科学的任务是“从思维的角度找出思维能力发展的途径”。

1990 年钱学森以“系统论”的观点,提出“从定性到定量的综合集成法(metasynthesis)”,并把这项技术与《实践论》结合起来,阐明了这项技术是在现在科学技术下《实践论》的具体化。紧接着他又汇总了几十年来世界学术讨论的 seminar、C^3/I 及作战模拟、人工智能、灵境技术(virtual reality)和“人-机结合”的智能系统。系统学等方面成功的经验,进一步提出我们的目标应该是建成一个“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”。其构思是把人集成于系统之中,采取“人-机结合”、以人为主的技术路线;这样才能充分发挥人的作用,使“研讨厅”的集体在讨论问题时成员间能够互相启发,互相激励,使集体的创见远远胜过一个人的智慧。通过“研讨厅”体系,还可以把今天世界上千百万人的聪明智慧和古人的智慧(这种智慧可以通过书本上的记载等,以知识工程中的专家系统体现出来)统统综合集成起来,以得出完备的思想和结论;这样就给予了科学与经验相结合的“从定性到定量综合集成的方法论”以科学的现代表达形式。

前面已经谈到思维科学的任务是从思维的角度找出思维能力发展的途径并付诸实施。钱学森通过他本人的研究,从总结 20 世纪 40 年代信息技术发展给人类带来前所未有的巨大影响;从科学是一个整体的观点构建了现代科学技术体系;从研究系统科学、人体科学、思维科学等新兴科学本身及与其他科学领域的交叉发展与整合;从培养 21 世纪新人考虑;从而形成了“大成智慧”学术思想,找到了思维能力发展的途径,并付诸实施。

---

① 钱学森. 系统科学、思维科学与人体科学. 自然杂志,1981,1

② 钱学森主编. 关于思维科学. 上海人民出版社,1986

24.2 适时提出“第五次产业革命”

邓小平关于“科学技术是第一生产力”的论点，是对唯物史观的重要发展。依据这种唯物史观，钱学森认为：科学革命是人类认识客观世界的飞跃，技术革命是人类改造客观世界的飞跃；而科学革命、技术革命又会引起社会整个物质资料生产的变革，即经济的社会形态的变格，这就是产业革命。早在1979年，他以“现代化、技术革命与控制论”为题目[①]，着重论述了对现代生产和现代科学技术的面貌发生深远影响的三项技术革命：① 核能技术革命；② 电子计算机技术革命；③ 航天技术革命。对其中第二项，他作了这样的表达：

蒸汽机和电力实现了生产过程的机械化，而监督与调整生产过程的工作仍需人工来完成。工人要不断照料机器的动作，用眼、耳和神经系统来直接获取生产过程的信息，然后由大脑对这些信息进行处理，作出要不要改变机器运行状况的决定，并通过手对机器的直接调整来执行这一决定。20世纪初以来，产生了能对各种物理量进行精确测量的感受器件，也产生了各种执行机构，获取机器生产状况的信息的工作，就由感受器件取代了人的器官；控制决定的执行，由执行机构取代了手对机器的直接调整。但是，控制决定还得由人直接作出，整个生产过程还需人的直接参与。这样一种状况影响着生产力进一步发展，对一些日益精密化、快速化的现代工业（如化学工程过程），人工控制已完全不能胜任，因为在这种情况下人的思维在速度、可靠性和耐力方面都显得不够。20世纪50年代出现了模拟自动控制设备，在一些不太复杂的生产过程中实现了自动控制。但是，这些设备一般不能用于复杂的现代化工业过程，不能进行数据处理，也不能用于整个工厂或车间的全盘自动化。电子计算机的出现并应用于工业生产，才使自动控制技术发生了革命。第一，电子数字计算机具有计算精确的特点，和数字化感受器件、数字化执行结构结合，能够实现工业生产过程的精密控制。第二，电子数字计算机具有很大的计算能力，可以根据生产过程运行状况的改变而自动改变调节参数；可以计算出生产过程的发展趋势，以便决定应当预选调整那些操作条件，所以计算机能够对复杂的工业生产过程实现自动控制。第三，计算机不仅能对生产过程进行最优控制，而且能对包括感受器件、执行机构和计算机本身在内的全部生产设备进行监督控制。所以计算机能够实现整个企业和企业体系生产过程的全盘自动化。

1944年那台名叫MARK-1的大型继电器式计算机，1945年宾夕法尼亚大学那台采用电子管代替继电器的ENIAC电子计算机，都出现在控制论完全形成之前。但是，用替续的开关装置和用二进制作为电子计算机设计的最合适基础，完全是受

① 钱学森. 现代化、技术革命与控制论（工程控制论修订版）. 北京：科学出版社，1980

惠于从1942年前后开始的控制论思想的发展：人的神经系统在做计算工作时，作为计算元件的神经元或神经细胞，实质上可以看作只具有两种动作状态的替续器。"工程控制论"出现以后，已日益深刻地被应用于指导电子计算机的设计。例如，能够记住主题并把以后接受的信息这个主题联系起来的智能终端，能够识别语言波形、完全按照声音来操作的计算机，能够直接把图像转变为数字信息存储、处理的计算机，以及具有一定自学习、自组织功能的以电子计算机为心脏的机器智能等等，都是用"控制论"原理来革新电子计算机体系结构的一些新发展。工程控制论正在推动电子计算机技术革命的深入。这样一个现实已经来到了人类的面前：由电子计算机和机器智能装备起来的人，已经成为更有作为、更高超的人！

关于产业革命，钱学森对人类生产发展的历史作了扼要概括，并适时地提出了"第五次产业革命"①：

在上古时代，当人们靠采集和狩猎为生时，是谈不上物质资料生产的，因而也就不存在什么"产业"。从这个意义上说，第一次产业革命大约发生在1万年前的新石器时代，即农牧业的出现。第二次产业革命是开始出现商品经济，即人们不再单纯为个人的生存、个人享用而生产，而是开始为交换而生产。这在中国，出现于奴隶社会后期，即公元前约1千年。第三次产业革命是18世纪末由于蒸汽机的出现，产生了大工业生产。第四次产业革命出现在19世纪末，即生产不再是以一个一个的工厂为单位，而是出现了跨全行业的垄断公司。第五次产业革命即目前正在发生的由信息革命所推动的经济的社会形态的巨变，全世界将逐渐构成一个整体来组织生产，出现世界一体化的生产体系。

当前人类正面临着由信息革命推动的第五次产业革命。从第一次到第四次产业革命，划分社会生产时代具有决定意义的特征，可以说是劳动资料的机械的、物理的和化学的属性。信息革命的核心是信息性的劳动资料，如能处理任何离散形式信息的可编程数字计算机。目前又出现了纳米技术(nanotechnology，即10^{-9}米分子尺度的技术)。数字计算机一直是建立在微电子学基础之上的，而纳米技术的发展则使数字计算机建立在分子电子学基础之上。另外，信息网络的建设，人们可以在极短的时间内与极远的地方进行联系，也是20世纪最伟大的通信奇迹的一部分，正在发展的宽频带综合业务数字网络(BISDN)，使信息传输在数量与质量方面的均有大幅度的提高，并很可能在21世纪初取代传统的电话网络，单个电话机、电视机和计算机的数量将不再大幅度增长；将由集三种功能为一体的多媒体信息装置所取代。

21世纪，人类必须在信息的汪洋大海中航行。人们的思维工作方法应该有一

---

① 马洪主编.跨入新世纪的必由之路.我们正面临第五次产业革命(戴汝为，于景元，钱学敏，汪成为，涂元季，王寿云).江苏科学技术出版社，1998

个飞跃，才能适应信息时代的要求。因此，总体规划我国第五次产业革命的思维工作方法成为必须解决的重要课题。20 世纪 80 年代初钱学森对处理“复杂系统”的定量方法学作了精辟的概括，提出将科学理论、经验和专家判断力相结合的半经验半理论的方法。此后他又提出“从定性到定量的综合集成研讨厅(hall for workshop of metasynthetic engineering)”体系可以看成是总体规划第五次产业革命思维工作方法的“核心”，它实际上是将我国民主集中制的原则运用于现代科学技术方法论之中，并寻求科学与经验相结合的解答。这样的研讨厅体系将是思维方法上的一次重大的变革。

24.3 大成智慧工程

钱学森在美国期间(1935～1953 年)，从在加州理工学院(CIT)读研究生开始到成为麻省理工学院(MIT)最年轻的教授以及加州理工学院的教授，他是以应用力学的研究而举世闻名。他在回国前的 1954 年，美国出版了他的专著《Engineering cybernetics(工程控制论)》。紧接着此书的俄文、德文、中文译本在相关国家先后出版。该书获 1956 年中科院自然科学一等奖。该书以其创新性、前瞻性而闻名，对培养我国新一代自动控制方面的专家起到了十分重要的作用，并在国际上获得极高的声誉；同时该书在 20 世纪 50 年代是自动控制领域中引用率最高的专著。2000 年国际著名的自动控制理论专家 Astrom 在他刚出版的一本新书中，一开始就引用了《工程控制论》“序言”中的一段话：“这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素，可是在其他各门自然科学中这些因素都是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质以及整个系统的总的运动状态。”如果我们着眼于物理世界三个要素的分析：物质、能量和信息，那么控制论只研究信息与控制，它不讨论能量和物质。由此可以看出钱学森早在 1955 年已经把研究的“着眼点”转到“信息与控制”方面了。

1978 年 9 月 27 日，钱学森与许国志、王寿云于在上海《文汇报》上发表了题为“组织管理的技术——系统工程”一文。这篇文章被誉为系统工程在我国发展的一个“里程碑”。他与王寿云、柴本良合作完成了军事系统工程的文章[①]，于 1979 年 7 月 24 日在中国人民解放军总部机关领导同志学习会上作了演讲，从而把系统工程用于军事领域，形成“军事系统工程”。

1990 年，钱学森等发表了，题为“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其

① 钱学森等. 论系统工程・军事系统工程(钱学森，王寿云，柴本良). 湖南科学技术出版社，1982

方法论”[①]的重要文章。该文将作者 20 世纪 80 年代初对处理复杂系统所概括的“经验和专家判断力相结合的半经验半理论的方法”进一步地加以提高和系统化，提炼出“开放的复杂巨系统”的概念；并以系统论的观点，在社会系统、人体系统、人脑系统及地理系统实践的基础上，提出处理“开放的复杂巨系统”的方法论，即“从定性到定量的综合集成法（metasynthesis）”，并作了如下解释：

综合“定性认识”，达到对整体的“定量认识”；“法”即技术工程，是“综合集成工程”；“综合集成工程”居思维科学的工程技术层次，创立并发展它将为思维科学的“技术科学层次”及“基础科学层次（思维学）”提供营养；所谓“定性”的东西，即现在各式各样的“专家系统”，综合集成靠人来综合这些专家系统，也就是变成“定量”的、更完善的智能。

“从定性到定量的综合集成法”，其实质是把各方面有关专家的知识及才能、各种类型的信息及数据与计算机的软、硬件三者有机地结合起来，构成一个系统。这个方法的成功之处就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势，为综合使用信息提供了有效的手段。按我国传统的说法，把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来，达到对整体的认识，称之为“集大成”。实际上，“从定性到定量的综合集成技术”，就是要把各种情报、资料、信息，把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧统统集成起来，因此可以称为“大成智慧工程（metasynthetic engineering）”。

钱学森在提出“从定性到定量的综合集成法”的过程前后有一个明确的观点是：面对着开放的复杂巨系统，这类问题应采取的对策是“人-机结合”、以人为主的综合集成，需要把人的“心智”与计算机的高性能两者结合起来。他总结了在思维科学与智能机有关问题的讨论过程中所得出的看法：“我们要研究的不是没有人实时参与的智能计算机，是‘人-机结合’的智能计算机体系”！他借鉴我国哲学家熊十力把人的心智（human mind）概括为“性智”与“量智”两部分，对“人-机”结合做了解释。我们可以这样理解：“性智”是一种从定性的、宏观的角度，对总的方面巧妙加以把握的智慧，与经验的积累、形象思维有密切的联系。人们通过文学艺术活动，不成文的实践感受得以形成；“量智”是一种定量的、微观的分析、概括与推理的智慧，与严格的训练、逻辑思维有密切的联系。人们通过科学技术领域的实践与训练得以形成。“人-机结合”是以“人”为主，“机”不是代替“人”，而是协助“人”。从信息处理的角度来考虑把人的“性智”与“量智”与计算机的“高性能”信息处理相结合，达到定性的（不精确的）与定量的（精确的）处理互相补充。目前人们清楚地认识到计算机能够对信息进行精确的处理，而且速度之快是惊人的，但它的不足之处是定性的（不精确）处理信息的能力却很差。尽管研究者将一系列近于定性处理信息的方法引入计

① 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，13(1)

算机系统中，企图完善其处理能力，但对于真正复杂的问题，计算机则还是难以解决。与此相反，与计算机相比较，人处理精确信息能力是既慢又差，但是定性处理信息的能力是十分高明的。因此在解决复杂问题的过程中，能够形式化的工作尽量让计算机去完成，一些关键的、无法形式化的工作，则靠人的直接参与，或间接的作用，这样构成"人-机结合"的系统。这种系统既体现了"心智"的关键作用，也体现了计算机的特长。这样一来人们不仅能处理极为复杂的问题，而且通过"从定性到定量的综合集成"，达到"集智慧之大成"。

1992年在"从定性到定量的综合集成法"的基础上，钱学森针对如何完成思维科学的任务——"提高人的思维能力"这个问题，汇总了几十年来世界学术讨论的seminar，C^3/I 工作及作战模拟、人工智能、灵境技术(virtual reality)、人-机结合的智能系统，及系统学等方面的经验，进一步提出我们的目标是建成一个"'人-机结合'，以人为主，从定性到定量的综合集成研讨厅体系"，简称"从定性到定量的综合集成研讨厅(Hall for workshop of Metasynthetic Engineering)"①。这是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的"厅"。这是把专家们和知识库信息系统、各种人工智能系统、每秒钟几十亿次的计算机、像作战指挥厅那样组织起来，成为巨型的"人-机结合"智能系统。"组织"二字代表了逻辑、理性，而专家们和各种"人工智能专家"系统代表了以实践经验为基础的非逻辑、非理性智能。所以这个"厅"是21世纪的民主集中制的"工作厅"，是辩证思维的体现。

20世纪90年代初期，美国政府提出"国家信息基础设施(NII)计划"，即人们易于接受而且经常谈到的"信息高速公路"计划后，引起国内外十分关注信息网络的建设；钱学森一直对信息技术在我国的发展极为关心。1995年6月20日他写信给他的同事们，对信息网络有关问题发表了自己如下的看法：

(1) 现在我国也在开始信息网络建设，这是第五次产业革命的先声。

(2) 大家似尚未意识到信息网络加用户将构成一个"开放的复杂巨系统"，不是简单巨系统，更不是大系统，小系统等容易调控的系统。

(3) 前见英刊《New Scientist》中就有文论及新加坡政府原来热衷于进入全球信息网络，以促进其经济发展，现在也察觉到这会引起许多难以调控的问题，所以政府决定放慢此过程，要研究对策和措施。

(4) 可否合作写一篇要上报刊的文章？指出信息网络与用户是一个"开放的复杂巨系统"，对世界社会开放，是人造的。我们必须用"系统学"与"开放的复杂巨系统"理论来研究制定宏观调控的方案。在一个"开放的复杂巨系统"出现前就考虑其调控手段，这在历史上还是第一次吧！定会引起大家对"开放的复杂巨系统"的注意。

---

① 王寿云，于景元，戴汝为. 开放的复杂巨系统. 浙江科学技术出版社，1996

以上这些思想的前瞻性，在历史的发展过程中被证实了。一个时期以来，国内从事信息网络的一些专家们对上述思想有了较深刻的认识，以万维网(World Wide Web)所呈现出来的自组织等性质，对互联网(Internet)加用户是"一个开放的复杂巨系统"作了科学的论述；另外对用"系统学"与"开放的复杂巨系统"的理论对网络进行宏观调控的看法已受到有关方面的重视。20 世纪末，钱学森的学生们在其学术思想的指导下，提出的项目："支持宏观经济的决策的从定性到定量的综合集成体系"，已经得到国家自然科学基金委的大力支持，并于 1999 年 6 月开始实施。他们充分利用网络技术，致力于把"从定性到定量的综合集成研讨厅"建立在 Internet(互联网)的基础上，做到了研讨不受时间和空间的限制，使"研讨厅"实际上是一个"赛博空间(cyberspace)"。这样的"研讨厅"就如钱学森所说的，是利用我们的现代科学技术体系的思想，综合古今中外上万亿个人类头脑的智慧！所以可以称之为"大成智慧工程"，而"大成智慧工程"的更高层次就是"大成智慧学"。

24.4　知识的源泉——现代科学技术体系结构

钱学森以自己亲身参与美国应用力学发展的深刻体会，论述了技术科学的重大意义与作用：在任何一个时代，今天也好，明天也好，一千年以后也好，科学理论绝不能把自然界完全包进去，总有一些东西漏下了，是不属于当时的科学理论体系里的，总有些东西是不能从科学理论推演出来的。所以虽然自然科学是工程技术的基础，但它又不能完全包括工程技术。因此有科学基础的工程理论就不是自然科学的本身，也不是工程技术的本身，它是介乎自然科学与工程技术之间的，它也是两个不同部门的人们生活经验的总和，有组织的总和，是化合物，不是混合物。要综合自然科学和工程技术，要产生有科学依据的理论，需要另一种专业的人。由此看来，为了不断地改进生产方法，我们需要自然科学、技术科学和工程技术三个部门同时并进，在任何一个时代，这三个部门的分工是必需的。

钱学森首先对自然科学与社会科学的历史发展进行了研究。历史的发展表明，人们开始时对自然界的认识还是片面的，人们总是要把片面的各方面的东西联系起来，作为对自然客观世界的一个总的认识。为了能联系起来未免加上自己的猜想。那时把猜想与科学联系在一起的人大多是哲学家，他们把这一客观世界的科学叫做"自然哲学"。到了 19 世纪的下半叶，出现了科学方面的三大突破：一是细胞学说，所有的生命都是细胞这个基本单元组成的；二是能量转换，不管什么形式的能量都是互相转换的，能量是不灭的；三是达尔文的进化论，物种的起源为什么是千差万别的，是怎么来的，怎么演变的。由于三个科学方面的突破，自然哲学就逐渐被"自然科学"代替了。

社会科学，可以说是 19 世纪后期才真正开始的。因为研究社会在马克思、恩格

斯以前是不科学的，也可以说是哲学性质的，猜的议论性质的。从历史上可以慢慢看科学的结构是怎样形成的：一是“自然哲学”变到“自然科学”，以后马克思、恩格斯才建立了科学的社会主义，然后又建立了社会科学。把自然科学、社会科学，再概括起来，而且是科学的概括，那就是马克思主义哲学。

这段历史给人以启示：科学是从不科学的东西来的。我们都怀着很客观而敬重的心态来看待的“自然科学也曾经是从不那么科学的东西来的”，今天认为是不科学的东西，或不那么科学的东西，人们不要看不起它，将来可能是大科学的来源，这是很重要的。

现代科学体系结构是钱学森从整体上对科学技术体系加以考虑，突破了人们以往对科学技术部门认识的局限性。他接受了著名物理学家普朗克的观点：“科学是内在的整体，它被分解为单独的整体，不是取决于事物的本身，而是取决于人类认识能力的局限性；实际上存在着从物理到化学，通过生物学和人类学到社会学的连续的链条，这是任何一处都不能被打断的链条”。在此基础上他进一步有所创新，构造了包括十一个技术部门的现代科学技术体系[①]。

钱学森于 20 世纪 80 年代在中央党校讲课时，首次把原来人们心目中的“自然科学”和“社会科学”两大部门，扩展到八大部门，加上数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、军事科学和文艺理论，形成了一个体系。过了几年又加上地理科学、行为科学。1996 年 6 月又提出建筑科学的设想，在这过程中曾与建筑专家及城市规划专家谈过。总之，现代科学技术体系是基于各门科学研究的对象都是统一的物质世界的认识，区分只是研究的角度不同，这就从根本上拆除了以往各门学科之间仿佛永远不可逾越的中界，也必然使辩证唯物主义与各门科学内在的、紧密地熔铸在一起。

这个体系从纵向分为三大层：最高层是马克思主义哲学，马克思主义哲学、辩证唯物主义是人类一切知识的最高概括；从智慧形成的高度，以“性智”与“量智”来概括各科技部门及文艺活动与美学对人类的“性智”与“量智”两种类型智慧的形成与影响；最下面一层是现代科学技术十一大部门，即自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、地理科学、军事科学、行为科学、建筑科学以及文艺理论与文艺创作；并分别通过 11 座“桥梁”：自然辩证法、唯物史观、数学哲学、系统论、认识论、人天观、地理哲学、军事哲学、人学、建筑哲学以及美学，把马克思主义哲学与十一大科技部门联在一起。

在每一大部门中，又分成“基础理论”、“技术科学”及“应用技术”三个层次。在十一大部门之外，还有未形成科学体系的实践经验的知识库，以及广泛的、大量成文

---

① 许国志主编. 系统研究. 祝贺钱学森同志 85 寿辰论文集 · 从现代科学技术体系看今后智能系统的工作(戴汝为). 浙江教育出版社，1996

或不成文的实际感受，如局部的经验、专家的判断、行家的手艺等等也都是人类对世界认识的珍宝，不可忽视，亦应逐步纳入体系。总之，这一分类法应显示出这十一大部门之间本来就是互相联系、互相促进、不可分割的关系，并揭示了马克思主义哲学与各门具体科学技术必然的、紧密的熔铸在一起的内在关系，形成统一完整的现代科学技术体系。以上所述的现代科学技术体系是钱学森近些年来心血与智慧的结晶，充分体现出他的“集大成”的智慧。

1991 年 10 月 11 日，钱学森在接受“国家杰出贡献科学家”授予仪式上的讲话中谈到：“我认为，今天科学技术不仅仅是自然科学工程技术，而是人认识客观世界、改造客观世界的整个的知识体系，这个体系的最高概括是马克思主义哲学。我们完全可以建立起一个科学体系，而且运用这个科学体系去解决我们中国社会主义建设中的问题”。

24.5 “人-机结合”出现“新人类”

如何提高人的智慧和能力的问题，有史以来一直为人们所关注，到了信息技术高度发展的 20 世纪，计算机与信息网络的出现，为人类智力的提高奠定了物质基础。与此密切相关的是关于思维规律的研究，包括逻辑思维，也包括其他各种思维过程，形象思维等等。1995 年钱学森把他多年前倡导的思维科学的研究作了界定，他以信息处理的观点阐明了思维科学的基础科学——思维学包括三个部分：逻辑思维、微观法；形象思维，宏观法；创造思维、微观与宏观结合。逻辑思维和形象思维都是手段，创造思维才是智慧的源泉。

人的聪明才智是通过实践，通过学习获得知识，包括经验知识，在脑子里有了大量的知识，再加以能利用所存储的知识，就能够处理与解决各种问题，一个人通过学习获得知识，从小学到大学，进一步到研究生是一个十分漫长的过程。通过学习获得知识，把知识存在脑中以及对知识进行处理是三个重要的环节。自古至今，中外的人们都是走这一条路以培育自己的智慧的。过去由于缺乏工具所以不得不花费很长的时间，通过学习增加知识，并记住所得到的知识。在今后的信息社会中，情况有了根本的改变；计算机的强大本领之一就是能存储信息，包括存储知识信息，并能以极快的速度处理信息，再加以目前的一些信息系统，例如用人工神经网络构成的信息系统，具有根据已有的样本，或者已有的经验进行学习的功能。总之通过智能系统，对人的成长来说，可以用机器来部分取代记忆与学习这两个重要的环节，使人类有可能改变以往成才的途径。

信息革命与现代科学技术体系的形成，将会以人-机结合的思维体系取代原来的以个人为主的体系；人脑和计算机都是信息处理的工具，人脑通过经验积累与形象思维，擅长于不精确的、定性的把握，而计算机则以极快的速度，擅长准确的、定量

的计算；两者充分发挥各自的优势，又互相结合，再加以综合集成法及从定性到定量的综合集成研讨厅体系在信息网络上实现，既能达到集智慧之大成，又由于通过反馈的作用，来提高人的思维效率，从而增强人的智慧。这是多么了不起的事！从人类的发展来看，“直接提高人的智慧”是人类有史以来的一种美好愿望，以往的历史阶段只是近于梦想，经历信息革命后，这一愿望将会变成现实。

钱学森十分重视对未来人才的培养，他提出了“大成智慧教育”的设想。今天，我国城市的青少年在改革开放的环境中学习、生活，他们除了完成学校里的课程外，从电视机、收音机，以及互联网中可以获得大量的信息，与他们的前辈相比，思维自然会有所差异，学生受正规教育的年限可以大大缩短。现代的人与以前的人相比较，从总的方面来观察与分析，他们的才能增加了。尤其是今后互联网成为人们生活、工作中离不开的工具，人们会变得更加聪明。因为知识体系对人的意识起着积极的作用。在互联网上利用知识体系，也就是用语言（语言实际上是由一串符号表示）和符号表达的知识来提高人的意识；在网上还有不是用语言表示的图像、动画等等也能提高人的意识，并把意识提高到思维。近年来，心理学家们重新发掘出 20 世纪 30 年代被埋没的前苏联心理学家 Lev Vygotsky 的学说，该学说认为，语言在人的意识中起着中心的作用。人们可以在网络上利用语言来提高人的意识，进而提高人的思维能力。

如果逐步地把现代科学技术体系的建设，尽可能地置于互联网上，那就在一定程度上体现 Popper 所说人类实践累积的知识信息的第三世界。再加以利用综合集成法，以及以互联网为基础的人-机结合的研讨厅体系，对信息、知识与智能三者加以处理。例如，利用综合集成法把大量信息加以集成，使之成为知识。目前从数据库里提炼出知识（KDD）的工作，已成为研究的热点之一，再从大量数据与知识之中，借助综合集成与研讨厅体系，通过三个世界间的交互作用，使“智慧”涌现出来。

可以预料，“人-机结合”的大成智慧的学术思想为人们所接受后，我国的教育系统必然会有所改变；如果在信息网络上建立起前一节所说的“现代科学体系”，其结果将使人类已掌握的与即将掌握的知识与技术能以极其灵活方便的方式为人类所共享；各式各样的智能系统将成为人类亲密而不可离开的工具；人的智慧得以充分发展，人类也跟着改造了。正如钱学森所说：将会出现一个“新人类”，不只是人，是“人-机结合” 的“新人类”！

25 人-机结合的智能科学和智能工程[①]

25.1 人工智能研究的回顾

20世纪40年代由于战争对科学技术的要求，用机器来模拟智能行为的研究适时兴起。Wiener提出了控制论[②]，这一学术思想在历史上可以认为是：实现机器智能在哲学、理论及方法方面的一次全面探讨。紧接着，中国学者提出了工程控制论[③]。现在回顾起来：控制论成为人们研制较简单（简单是相对而言）的系统，系统运行的环境也不复杂情况下的一面旗帜；Wiener理论所采用的基于连续动力学方程的方法对实际世界的描述是有益的；但由于技术条件的限制，并未能成为发展人工智能的基础。1956年Dartmouth会议上，J. Mccarthy、H. A. Simon等倡议开展人类思维活动规律的研究，并给予了“人工智能”的命名[④]。由于提出来的目标简洁而又具有吸引力，很快为科技界所接受，但由于方法论及追求的目标存在着问题，却为后来的研究者埋下了束缚思想的桎梏。以人工智能为旗帜所取得的成就主要体现在专家系统方面，即把知识经验注入系统之中。20世纪70年代以后，数字信息技术、控制论（cybernetics）得到迅猛发展；电子计算机以其独特的功能，进入各个领域，甚至令人惊呼是一个计算机时代的来临。有了计算机（又称电脑），那么人脑的某些功能是否能由电脑来取代呢？这是个十分吸引人的问题。当时日本曾经制订与实施了一个模式信息处理计划，简称为PIPS（Pattern Information Processing Systems）计划。顾名思义，这是致力于发展模式信息处理，其核心是发展模式识别（pattern recognition）有关的技术；主要是用计算机来实现模式识别。而人的模式识别是人的智慧的一种体现。PIPS计划于1978年完成，同年12月日本的科技专家，

---

① 戴汝为. 人-机结合的智能科学和智能工程. 中国工程科学，2004，6(5)

② Wiener. N. Cybernetics or Control Communication in the Animal and the Machine，John Wiley&Sons，Inc，1949

③ Tsien. H. S（钱学森）. Engineering Cybernetics McGraw Hill Publishing Company Ltd，Newyork，London，1954

④ Crevier. D. AI，The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence Basic-books，1993

在京都举行的第四届国际模式识别大会上，兴高采烈的报告与显示了他们在文字、图像、声音、机器人等方面获得的结果[①]。紧接着，在20世纪80年代初，日本提出了“第五代计算机”计划，这个计划又称为知识信息处理计划，即KIPS(Knowledge Information Processing Systems)计划。这个计划提出后，日本的科技专家颇为自豪地宣称，将以知识系统对世界的人工智能作出贡献[②]，正是在这种情况下，我国863计划中的智能计算机主题也开始实施了。

日本的第五代计算机计划，我国的智能计算机计划都是与人工智能(AI)的研究密切相关[③]。回顾这段历史的另一面是，人们对30多年来人工智能进展缓慢的原因有所分析，人工智能曾遭到过不少次批评。哲学家休伯特·德雷福斯(H. L. Dreyfus)在1979年的《计算机不能做什么》一书中(副标题是“人工智能的极限”)，提出了一些重要的和带有根本性的问题[④]。他看到所有的人工智能基础研究进展都十分缓慢，他把这种进展缓慢看作是存在着不可逾越障碍的标志，而不是那种为克服困难取得成功之路上所应付出的正常代价。AI的实践表明虽然专家系统的研究获得了成功，但20世纪80年代后期的一系列事件又强烈地冲击了AI研究者辛辛苦苦建立起来的体系。例如，在人工神经网络方面，由于反向传播网络的成功，使AI的研究者不得不承认，人工神经网络及大规模并行处理技术对于模拟人类的“感知”，是一条有效的途径。实际上联接机制网络是描述智能行为的另一类重要理论基础。日本第五代计算机的研制未达到预期效果是对传统AI的一次冲击。在1991年悉尼举行的国际人工智能联合会议上，M. I. T的布鲁克斯(R. Brooks)提出具有挑战性的“没有推理”的智能系统(布鲁克斯的工作从系统理论中的自组织概念来加以解释更为合适)，对传统的人工智能又是一次冲击[⑤]。后来一位心理学家波登(M. Boudon)从不同于德福雷斯的观点的另一角度来评价AI的成就。她认为：“AI的主要成就在于明确的促使我们鉴赏到人的心智(human mind)是极其巨大、丰富与难以捉摸的。人们可以通过AI的途径来了解人的心智的某些方面。例如人的创造性的某些方面可以通过建立有关创造性的计算机模型开始加以了解”。如果说德雷福斯消极的看出，用计算机来实现AI的局限，那么波登则是从积极方面看到人的意识作用。而且她的看法说明在心理学和AI之间的相互有所反馈，是比较辩证的，她的见

---

① The 4th International Conference on Pattern Recognition, Kyoto, Japan, 1978

② 杨效农主编. 人工智能对世界的挑战.《参考消息》编辑部编，1978

③ 戴汝为，史忠植主编. 人工智能与智能计算机 1991年全国人工智能与智能计算机学术会议论文集. 北京：电子工业出版社，1991

④ Dreyfus. H. 计算机不能做什么(中译本). 北京：生活·读书·新知三联书店，1966

⑤ 戴汝为，王鼎新. 人工智能发展的几个问题——1991年国际人工智能大会简介. 模式识别与人工智能，1992，5(1)

解是对人-机结合观点的支持。总之，人们在人工智能（AI）的旗帜下满怀希望地奋斗了多年，由于历史的局限及对问题的困难程度估计不足，使人工智能30多年的研究历史充满着曲折。这里重要的是明确了以往自觉或不自觉地采用还原论的局限性，从总的方面对人工智能有了较清楚的认识。另一方面从对科学技术的需求来看，当前的信息社会中，信息技术是立国之本。信息技术再进一步发展，则成为以“智能”为核心的技术。例如海湾和伊拉克战争所显示出来的智能化的高、新技术在战争中的作用就很说明问题。国内外有识之士已经了解到今后智能技术将会覆盖几乎所有主要工程技术领域。实际上，根据对智能技术的需求程度，可以将智能工程分为两类：一类是所需研究解决的问题的核心就是智能行为的模拟；另一类则是所需解决的问题中的某个部分采用已有的智能技术后会有改善或效果显著。总之也就是说智能工程所提供的一些设计构思、技术措施、实现途径等都可以为各工程领域加以借鉴、仿效。

通过以上分析，我们可以看出人工智能正处于一个转折期，把有关智能的研究划分为智能科学与智能工程是合适的，这有利于智能科学的学科建设，并在此基础上发展具有十分广阔前景的智能工程技术。

25.2　智能科学与智能工程的提出

日本的第五代机的研制未达到预期的效果，是对传统人工智能的又一次冲击。这表明传统AI，过分突出机器智能所带来的后果。人们从实践中认识到，利用并发挥人的“心智”和计算机的高性能，把人和计算机相结合是正确的途径。换句话说，要研究的是人与计算机结合的智能系统。钱学森在1991年4月18日与他指导的科研集体中的部分成员作过如下谈话：“智能系统是非常重要的，是国家大事，关系到下一个世纪我们国家的地位。如果在这个问题上有所突破，将有深远的影响。我们要研究的问题不是智能机，而是人与机器相结合的智能系统。不能把人排除在外，应该是一个人-机智能系统”。谈话的内容还包括以下三点：第一，人的意识活动是很丰富的，包括自觉的意识、下意识，人是靠这些来认识世界的；第二，为认识世界和改造世界，人始终发挥着主导作用，我们要研究的是人和机器相结合的智能系统；第三，现在还不可能很快实现这种人-机智能系统，目前只能作些“妥协”，实事求是，尽量开拓当前计算机的科学技术，使计算机尽可能多地帮助人来做些工作。这次谈话在1995年出版的书中有所记载[①]，对人工智能、智能计算机的研究具有极其深远的指导意义。

钱学森不仅总结了应该发展人-机结合的智能系统，并且于20世纪90年代初

---

① 戴汝为，王珏，田捷. 智能系统的综合集成. 浙江科学技术出版社，1995

提出开放的复杂巨系统及处理这类系统的方法论[①②]，主张采用"从定性到定量的综合集成技术"，把人的思维、思维的成果、人的知识、智慧以及各种情报、资料、信息统统集成起来，通过"从定性到定量的综合集成研讨厅体系"，致力于把今天世界上千百万人的聪明才智和已经不在世的古人的智慧都综合起来形成一个工程领域。紧接着，综合集成的思想在人工智能领域中得到充分的发挥。按中国文化的习惯，把一个非常复杂的事物的各个方面综合起来叫做"集大成"。所以把该领域称为"大成智慧工程(metasyntactic engineering)"。如果将这一工程进一步发展，在理论上提炼成一门学问，就成为"大成智慧学"。

在此基础上，作者在中国科学院第七次院士大会学术报告会上，正式提出"智能科学与工程(人-机的结合)"是一个新的科学技术领域[③]。对智能科学与工程的基础、任务、方法、技术路线进行了论述，并对智能科学与工程与其他学科的区别有所界定。

25.2.1 智能科学与工程两个基本假设

一是 Popper 关于三个世界的说法；另一个是熊十力关于人的智慧分两部分的观点。

(1) 智慧来源的假设：第一世界是物理世界；第二世界是主观世界，包括脑；第三世界是人类实践积累的知识信息世界，是前人和他人实践的创造物。而人的思维能力与智慧的来源是第二世界与自身，与第一世界，与第三世界互相作用的结果。

(2) 人的智慧划分的假设：人的智慧(human mind)分为性智(qualitative intelligence)与量智(quantitative intelligence)两部分。前者是由经验、社会与文艺等培养所形成，体现为判断和把握全局的智慧；后者是通过分析，计算与推理培养的智慧，可以用目前的计算机加以模拟与实现的智慧。

25.2.2 智能科学的研究任务及方法论

(1) 智能科学的研究任务：了解人的心智；模拟思维与智能；建立人-机结合(人机一体化)的系统的理论。

(2) 智能工程的任务：构建各种实用的智能系统；研制各种智能系统的开发工具。

---

① 钱学森，于景元，戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志，1990，13(1)

② 王寿云，于景元，戴汝为，汪成为，钱学敏，涂元季. 开放的复杂巨系统. 浙江科学技术出版社，1996

③ 戴汝为. 智能科学与工程. 中国科学院第七次院士大会学术报告摘要汇编(预印本)，1994

(3) 智能科学的方法论：克服近代科学还原论方法论的束缚；以整体论和还原相结合，作为学术研究的主导思想。

25.2.3　智能科学的技术路线

采用从定性到定量的综合集成法，以人-机结合为指导方针把各方面有关专家的知识及才能，各种类型的信息及数据与计算机的软件三者有机地结合起来，构成一个系统，发挥系统的整体优势和综合优势。

25.2.4　与思维科学与认知科学的不同

智能科学与工程研究的着重点在于人的智能与计算机的高性能两者的结合，构建人-机结合的智能系统。思维科学着重研究思维的规律，旨在建立人工智能的基础。认知科学着重研究人的认知，并扩展为研究动物的智能，及机器智能。

25.3　智能科学和智能工程的构思

25.3.1　智能科学与工程的构思

智能科学与工程强调人类的“心智”与机器的“智能”相结合，追求的是人与机器相结合的智能系统，从体系上讲，人作为一个成员，综合到整个系统中去，利用并发挥人类和计算机各自的长处，把人和计算机结合起来形成新的体系。强调人在未来智能系统中的作用，是对传统人工智能研究，也是对传统自动化研究目标的革命，这将带来一系列在研究方向及研究课题上的变革。另外“人作为智能系统成员”的论点，也包括两个层次，即界面与体系两方面的含义。人机界面是实现上述论点的必要条件。这里所说的人机界面，其含义不同于那种基于图形学的人机界面，而是包含了模式识别这类涉及感知方面问题的更广义的人机界面。目前这方面的工作是十分活跃的，有代表性的研究有两类：① 多媒体技术；② “灵境(virtual reality)”技术。根据美国麻省理工学院多媒体实验室的规划，多媒体包括以下三个部分：① 学习与常识；② 感知计算；③ 信息与娱乐。我们可以看出 MIT 对于多媒体的论述是与模拟人类的智能行为紧密相关。换句话说，就是将人机通讯的过程同样理解为一种智能行为，这是十分引人注目的。关于“灵境”技术，目前还不够成熟，其思想是力求人在求解问题的过程中使其有身临其境之感。“灵境”技术使人的感觉大大拓宽，小至分子大至宇宙都可如同亲临其境，将使人的感觉及认知来一次飞跃。

25.3.2　智能科学和工程研究领域的开拓

自从作者提出智能科学与工程十年来，在此领域不断进行研究和开拓，先后承

担了几项国家项目:支持国家宏观经济决策的从定性到定量的综合集成法("863"项目);认知科学若干前沿重大问题(C),思维与智能模拟(攀登计划项目);支持宏观经济的人-机结合,综合集成研讨厅体系(自然科学基金委重大基金项目)。

在完成上述计划的过程中,编写了智能自动化丛书一套共六册,先后由浙江科技出版社出版;根据研究总结、成果呈报及学科评审的需要,撰写了有关人工智能、模式识别、综合集成、综合集成研讨厅等方面的学术论文。因篇幅有限,仅列出其中的一小部分①~⑬。

这套丛书中《智能系统的综合集成》专著的特点,是把一切智能系统都放在"从定性到定量的综集成法"和"大成智慧"来考虑。过去几十年世界的自动化科学技术发展,形成两大块:一是由所谓软件技术发展起来,现在出现了CIMS、CAE,以及灵境技术、Virtual prototyping等等;二是所谓AI。而现在这两大块又趋于融合,都是人-机结合的智能系统。该书自始至终都阐述了这个观点。

另一本专著《汉字识别的系统与集成》,主要把综合集成法的构思用于模式识

---

① 戴汝为. 模式识别的一类属性文法. 自动化学报,1983,9(2)

② Tai,J. W(戴汝为). A Syntactic-semantic Approach for Describing Chinese Character, Computer Processing of Chinese&Oriental Languages,1984,1(3)

③ Tai,J. W(戴汝为),Wang. J(王珏),Chen. X(陈欣). A Syntactic-Semantic Approach for Pattern Recognition and Knowledge Representation, Journal of Computer Science and Technology, 1988,3(3)

④ 尹红风,戴汝为. 论思维及模拟智能. 计算机研究与发展,1990,27(4)

⑤ Yin,H. F(尹红风),Dai,R. W(戴汝为). An Associative Memory Model of Language, Proc,Internation,Joint Conference on Neural Networks,San,Diego,USA,1990

⑥ Dai,R. W(戴汝为). The Principles of Artificial Neural Network Information processing, Physics and Contemporary Needs,Edited by Khwaja Yaldram and M,Munim. Awais. Pinstech,Pakistan,1992

⑦ 戴汝为,王珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报,1993,19(6)

⑧ 戴汝为. 人机结合的大成智慧. 模式识别与人工智能,1994,7(3)

⑨ 杨立,戴汝为. 模式的语义描述与识别. 中国科学(E辑),1996,26(2)

⑩ 戴汝为. 认知科学进展. 中国科学基金,1997,11(1)

⑪ 戴汝为. 复杂巨系统科学——一门21世纪的科学. 自然杂志,1997,19(4)

⑫ 戴汝为,操龙兵. Internet——一个开放的复杂巨系统. 中国科学(E辑),2003,33(4)

⑬ Cao,L. B(操龙兵),Dai,R. W(戴汝为). Agent-Oriented Metasynthetic Engineering for Decision Making,International Journal Information,Technology&Decision Making,2003,2(2)

别，形成集成型模式识别的新方向，把汉字识别领域上升到一个新的台阶[①~③]。

与智能科学相关联，近些年来作者又开展了系统复杂性的研究；这是学科交融、整合的结果。为适应学科建设的需要，在中科院自动化所成立了系统复杂性中心，并相继在一些院校建立了系统复杂性研究部门，在智能科学与复杂性结合的研究领域开展了一些工作[④⑤]；一些系统复杂性研究单位合作，创办了专业刊物，作为推动智能科学与工程和系统复杂性研究的学术园地。

综上所述，这些从基础到应用项目的研究成果，已经支撑起智能科学和智能工程的学科建设，具有中国特色的人-机结合的智能科学与智能工程这一新的科技领域已经在我国蓬勃地开展了起来。

25.4　智能科学与智能工程展望

(1) 智能科学的发展首先应从研究人的心智入手来模拟人的思维与智能。从近代科学发展的历程和现代科学的成果中，归纳出应该采用以整体论和还原论相结合走，人机一体化的道路，无疑这应该是智能科学研究一个历史时期的主导思想。

(2) 系统科学的发展，大量非线性现象。小概率异常事件等非确定性的出现以及面对结构不良的系统，导致了系统复杂性研究的崛起，这从另一侧面反映了智能科学的任重道远，也正是智能科学研究的内涵。作者十余年来从事系统复杂性和智能科学研究中深切体会到：两者密不可分，结合研究取得进展；复杂巨系统的方法论——从定性到定量的综合集成，也正是智能科学研究的方法论。

(3) 智能工程，也就是创建多种形式的智能化系统。既是适应现代经济、军事和科技发展的需要，也是智能科学和复杂性科学研究的实际应用。智能系统事例的重要特点之一，就是人-机结合，以人为主的综合集成体系。实践证明，这种“研讨厅体系”既可以用于支持宏观经济决策，也可以在军事指挥、方针政策、重大项目等的

---

① Xiao, X. H(肖旭红), Dai R. W(戴汝为). On Line Handwritten Chinese Character Recognition Directed by Components with Dynamic Templates, International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1998, 12(1)

② Xiao, B. H(肖柏华), Wang, C. H(王春恒), Dai, R. W(戴汝为). Metasynthetic Approach for Handwritten Chinese Character Recognition, Int. J. Information Technolog&Decision Making, 2002, 1(4)

③ 王春恒，肖柏华，戴汝为. 手写汉字的并行紧致集成识别方法. 中国科学(E辑)，2003，33(10)

④ 戴汝为. 组织管理的途径与复杂性探讨. 科学，1998，50(6)

⑤ 戴汝为. 系统科学及系统复杂性研究. 系统仿真学报(系统复杂性研究专辑)，2002，14(11)

决策中发挥科学化作用，所以会逐步进入国家和社会以及大型企业的决策程序，成为信息社会必需的智能系统。

人是万物之灵，人类有史以来就开始探讨本身的智慧问题。以往是一种思辨式方式的探讨；随着科学技术的发展，人们从宏观与微观两方面加以探索。计算机问世后，机器智能曾经是人们关注的热点之一，随着科学技术的发展与时俱进，形成了人-机结合，以人为主的智能科学与工程的学科。在有关科技工作者的共同努力下，这个学科必将为社会主义建设做出重大贡献。从我国宏伟建设及全球化竞争的需要出发，“智能科学与智能工程”必将更加蓬勃发展。

26 人-机结合的智能工程系统[1]

26.1 开放的复杂巨系统概述

1990年钱学森等发表了“开放的复杂巨系统(Open Complex Giant Systems)”这一科学的论断[2][3][4],从而开拓了复杂性科学的新领域。其后许多学科的深入研究证明,人脑系统、人体系统、环境及生态系统以及社会系统,特别是Internet系统,就其在结构演化方面的复杂性而言都属于OCGS[5]。

OCGS理论刚诞生时,在广大的科技界尚缺乏共识。10年后,面对全世界影响深远的Internet,我们不得不为我国老一辈科学家的前瞻性论断所折服。Internet可以看作是人类在研究和改造自然的过程中为服务于人类而创造出来的具有网络智能的、全球最大的人工机器与几亿用户共同构成系统与特殊复杂的社会系统的结合物。这个系统汇聚着自然界和社会的过去、现在和未来,关系到人们的日常工作与生活,国家的战略与安全;又由于这个系统具有很强的技术性和工程性,呈现了人文与科技相融合的态势。这不正是典型的OCGS吗?

20年来经过各个领域的专家学者进行交流讨论,并在各自的领域中开展了深入的研究,使得大家对开放的复杂巨系统及其方法论有了进一步理解和认识。

对OCGS的特性概述如下:

(1) 开放性。系统与外部环境,以及子系统之间,存在能量、信息或物质的交换。就系统与环境的关系而言,开放表现为最复杂与最常见的不确定的、动态连续的环境类型。复杂性不仅体现在系统本身,而且体现在环境。

(2) 多层次性。从已经认识的比较清楚的子系统到可以宏观观测的整个系统

---

① 戴汝为. 人-机结合的智能工程系统——处理开放的复杂巨系统的可操作平台. 模式识别与人工智能,2004,17(3)

② 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域 —开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志,1990,13(1)

③ 王寿云,于景元,戴汝为,汪成为,钱学敏,涂元季. 开放的复杂巨系统. 浙江科学技术出版社,1996

④ 卢明森. 开放的复杂巨系统的形成. 中国工程科学,2004,1(5)

⑤ 戴汝为,操龙兵. Internet——一个开放的复杂巨系统. 中国科学(E辑),2003,33(4)

之间层次很多，甚至有几个层次也不清楚；系统子系统或者组件的组成模式多种多样，有的甚至不清楚具体模式，或是一些基本模式的组合，或是变异体。

(3) 涌现性。系统是由时空交叠或分布的组件构成的；肩负不同角色的组件间通过多种交互模式、按局部或全局的行为规则进行交互，组件类型与状态、组件之间的交互，以及系统行为随时间不断改变；系统中子系统或基本单元之间的局部交互，经过一定的时间之后在整体上演化出一些独特的、新的性质，形成某些模式。

(4) 巨大性。系统中基本单元或子系统的数目极其巨大，从成千上万甚至到数以亿计。

同时，众多开放的复杂巨系统，例如：与经济和社会有关的巨型系统，往往表现出人-机共存的特点。在系统体系中人既是系统的高级智能组件，也是系统演化发展的关键因素。对这类系统的处理，不能仅靠机器处理，还需要发挥人及其群体的知识、智慧与创造性。

26.2 从定性到定量的综合集成技术

处理 OCGS 用的是从定性到定量的综合集成技术[①②]。经过两代科学家的不懈努力，对于综合集成技术已经有了明确的认识。从根本上讲是把信息、知识和智慧三个不同层面综合集成起来，从现代技术发展来看就是通过人-机结合的方法采用信息技术与网络技术来获得新的知识。综合集成可概括如下：

将专家群体(各方面有关的专家)、数据和各种信息与计算技术和网络技术有机地结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来，这三者本身也构成一个系统。这个方法的成功应用就在于发挥这个系统的整体优势和综合优势。

用综合集成技术解决开放复杂巨系统的问题，大致可分为以下步骤[③]：

(1) 明确任务、目的是什么？

(2) 尽可能多的请有关专家提意见和建议。专家的意见是一种定性的认识，肯定不完全一样。此外还要搜集大量的有关文献资料，认真地了解情况。

(3) 通过上述两个步骤，有了定性的认识，在此基础上建立一个系统模型。建立模型的过程中必须注意与实际调查数据结合起来，统计数据有多少就需要多少个参数。然后用计算机进行建模的工作。

---

① 戴汝为. 从定性到定量的综合集成技术. 模式识别与人工智能，1991，4(1)

② 戴汝为. 从定性到定量的综合集成(Metasynthesis)——开放的复杂巨系统的方法论. 来自科学前沿的报告. 清华大学出版社，1996

③ 戴汝为. 从定性到定量的综合集成(Metasynthesis) —开放的复杂巨系统的方法论. 来自科学前沿的报告. 清华大学出版社，1996

(4) 模型建立后，通过计算机运行得出结果。但结果的可靠性如何，需要把专家请来，对结果反复进行检验、修改，直到专家认为满意时，这个模型才算完成。

这个方法综合了许多专家的意见和大量书本资料的内容，不是某一个专家的意见，而是专家群体的意见，是把定性的、不全面的感性认识加以综合集成。

26.3 以综合集成为基础的人-机结合智能系统

“综合集成研讨厅(Hall for Workshop of Metasynthetic Engineering，简称HWME)”的最初论述是钱学森根据他长期从事“两弹一星”的科技与经验的体会，是对处理复杂问题方法的进一步具体化的一个总结，他于1992年向他的合作者们提出的一个“HWME”的理论框架①。在这个阶段我国正在实施“863”计划，其中“863—306主题”智能计算机计划正鼓舞着我国人工智能领域的工程技术人员的工作热情，1954年在中国科学院技术科学部的学术报告会上，作者强调了人与计算机两者相结合的重要性提出了人-机结合的智能系统，以及发展与以往“人工智能(artificial intelligence)”不同的智能科学与智能工程②③，研究的重点在于人的智能与计算机的高性能两者的结合，形成人-机结合的智能系统。它强调的是人类的“心智”与机器的“高性能”相结合。

总之，为处理OCGS有关的问题，在综合集成方法论的基础上，针对所要处理的复杂问题，建立一个人-机结合的智能工程系统成为核心问题，由此可知有关人脑的智慧及计算机处理信息的高性能问题就是焦点所在。根据这种情况，迫切需求认知科学(cognitive science)或称思维科学(noetic science)和人工智能(Artificial Intelligence)的支持。关于认知科学，1998年在美国华盛顿，由美国科学基金会组织了有30个大学约100位专家参加的认知科学家教育会议，会上对认知科学形成了一致的看法：“认知科学是研究人的智能(intelligence在海峡两岸分别译为智能与智慧)、其他动物的智能及人造系统智能的科学④”；人工智能的先驱者、美国的司马贺(H. A. Simon)1987年访华时给钱学森的信中，认为我国提倡的思维科学，就是西方的认知科学。钱不同意，他认为西方的认知科学起指导作用的哲学思想方面有一定问题，

---

① 王寿云，于景元，戴汝为，汪成为，钱学敏，涂元季. 开放的复杂巨系统. 浙江科学技术出版社，1996

② 戴汝为. 智能科学与工程[人-机的结合]. 中国科学院第七次院士大会学术报告摘要汇编(预印本)，1994

③ 戴汝为. 人-机结合的智能科学与智能工程. 中国工程科学，2004，6(5)

④ 戴汝为. 认知科学进展. 中国科学基金，1997，11(1)

所以宁愿用思维科学一词[①],他最初提出思维科学的构思之一是建立有关"人工智能"研究的基础[②]。总之认知科学与人工智能的研究对构建"人-机结合"的智能系统起着十分重要的作用。

另外在1993年,国家八五基础研究,重大项目(或称国家攀登计划)中,列了一个"认知科学前沿领域若干重大问题研究"。作者有幸作为首席科学家承担了三个子项之一:思维与智能的模拟。这个项目的总体目标是"通过研究思维与智能的模拟来构建智能系统进而形成开放的复杂巨系统的理论",经过五年(1992～1997年)的工作,推动了人-机结合智能系统的发展,一个重要的收获是"把智能系统的研制建立在综合集成方法论的基础上,并建立了一个巨型智能系统的体系(包括从定性到定量的综合集成研讨厅)",在完成计划的过程中出版了一套共六册的《智能自动化丛书》。该丛书的第一册《智能系统的综合集成》于1995年出版[③]。这册书中以题为"巨型智能系统的研究",把当时人工智能领域中,国际上在进行研制的一些著名的智能巨系统,就"封闭与开放"的问题做了阐述,并把智能系统在研制过程及问题求解过程等两方面加以引申说明。HWME属于开放的巨型智能系统的范畴,与其他巨型智能系统相比较,开放的巨型智能系统堪称"社会智能系统"具有如下特点:

(1) 系统中不仅包括计算机子系统也包括人,由此导致了研究人在智能系统中的作用及人机通讯等问题[④⑤]。

(2) 系统中的成员在实际问题求解中动态的组成层结构,同时这些层在一个求解过程中也是变化的。

(3) 在系统中成员的个性包括表示、推理甚至组成是多种多样的[⑥⑦]。

(4) 系统组成自身也是动态的。

从综合集成的方法出发,其关键问题在于:① 人-机体系;② 系统理论的原理在AI中的应用。其重要性与迫切性逐渐呈现在国家及社会的发展之中。

26.4 处理OCGS的可操作平台——HWME体系

作者和他的同事通过4年多的努力,投入由博士后和博士生为主的科研人员参

---

① 赵光武主编. 思维科学研究附录:钱学森给戴汝为的信. 中国人民大学出版社,1999

② 钱学森. 关于思维科学. 上海人民出版社,1986

③ 戴汝为,王珏,田捷. 智能系统的综合集成. 浙江科学技术出版社,1995

④ 王丹力,戴汝为. 群体一致性及其在研讨厅中的应用. 系统工程与电子技术,2001,23(7)

⑤ 王丹力,戴汝为. 综合集成研讨厅体系中专家群体行为的规范. 管理科学学报,2001,4(2)

⑥ 操龙兵,戴汝为. 基于Internet的综合集成研讨厅体系结构研究. 计算机科学,2002,29(6)

⑦ 操龙兵,戴汝为. 面向Agent的开放巨型智能系统的处理机制. 模式识别与人工智能,2002,15(3)

加的数十个人的工作量，研制完成了以Internet为基础的分布式研讨厅雏形系统[①~⑥]。该系统具有较强的实际可操作性，表现在：

（1）人-机结合以人为主。人始终起指导作用，让使用者回归到了现实社会中的人和人的交流当中。

（2）面向网络。提供目前最可靠的和易用的基于Web的协同工作平台[⑦]。适合有广泛交流沟通需要的一切企业、机关、研究单位等。

（3）资源共享。实现存在于人的大脑里的知识共享。

（4）实时跨平台协作。从Windows延伸到Mac、SunOs和Linux，做到研讨厅无处不在。

（5）多媒体接口设计。使用即时语音交流、手写汉字识别、指纹识别、视频会议等多媒体手段。

（6）结合知识管理。体现知识生产与服务体系[⑧~⑩]，实现民主集中的工作空间。

---

① 操龙兵，戴汝为．综合集成研讨厅软件体系结构．软件学报，2002，13(8)

② 张家才，周登勇．从开放的复杂巨系统来看Internet中的大范围模式．系统仿真学报，2002，14(11)

③ 崔霞，戴汝为，李耀东．群体智慧在综合集成研讨厅体系中的涌现．系统仿真学报，2003，13(1)

④ Cui. X(崔霞)，Li，Y. D(李耀东)，Dai，R. W(戴汝为)．A New Intelligent Field：Metasynthetic Engineering，ICCA，Montreal Canada，2003

⑤ Li，Y. D(李耀东)，Cui. X(崔霞)，Dai，R. W(戴汝为)．MESSIA：Combining Message with CAIA，ICCA，Montreal Canada，2003

⑥ Gao，H. X(高红霞)，Dai，R. W(戴汝为)．The Share，Reuse and Evolvement of Knowledge Based on Ontology in Online Organizational Discussion，Proc，12th Intel，Conf，Management of Technology，Nancy，France，2003

⑦ Zhang，J. C(张家才)，Dai，R. W(戴汝为)．Research or Some Key Insure as WWW Collaborative Recommendation System，5th China-Korea Joint Symposium on Oriental Language Proceeding&Pattern Recognition Qingdao China，2004

⑧ Gao，H. X(高红霞)，Zhou，X. J(周晓纪)，Dai，R. W(戴汝为)．Knowledge Reengineering and Reusing Based on Ontology in Online Organizational Discussion，Proc，Of the 4th Intel，Conf，On Control and Automation，Montreal，Canada，2003

⑨ Gao，H. X(高红霞)，Dai，R. W(戴汝为)．HWME A Think Tank on Web for Decision-Making Related to Complex System，Accepted by 1st International Workshop on Socio-Cognitive Grids，Santorini，Greece，1st-4th of 2003

⑩ Lu，Z. J.(吕志坚)，Dai，R. W(戴汝为)．A New Revised AHP and its Application in Multi-Criteria Decision Analysis，33rd Intel，Conf，On Computer&Industrial Engineering，Jeju Island Korea，2004

研讨厅的客户端运行界面如图 26-1 所示：

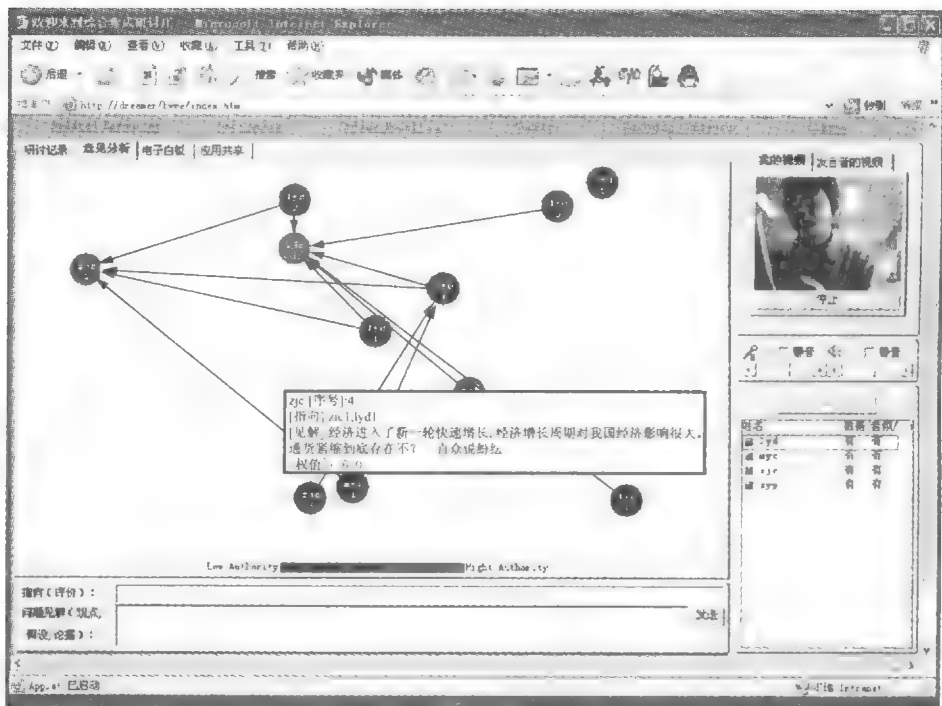


图 26-1　研究厅的客户端运行界面

HWME 是一类巨型智能工程系统。在这个系统中，参加研讨的人与人，人与计算机，计算机与计算机密切合作、借助网络与数据仓库等技术对所要研讨的复杂问题进行研讨与反复论证。它的特点如下：

(1) 从整体出发的群体智慧的涌现。针对一个复杂的问题，把万维网作为基础，构建 HWME 体系：首先围绕着所要解决的问题，在网上进行搜索，获得针对该问题的一些“权威网页”，把这些网页集合，作为“广义专家”与参加研讨的人专家(人)组成一个“广义专家群体”。针对问题进行从定性到定量的研讨，通过广泛的交互作用，使群体的智慧涌现出来，从而给出在一定程度上满足要求的定量认识。

(2) HWME 体系的链接结构。HWME 体系的链接结构是借鉴万维网网页链接的办法，通过广义专家群体的有效互动建立起来的。根据个体之间的响应关系建立广义专家群体的有向图(directed graph)表示的有向链接结构。这里把有向图扩大为“有向属性图”，专家每一阶段的发言为一个节点，节点带有属性(attributes)，即专家发言的内容称为内容属性，两个节点连接的边的箭头指向作为边的属性，称为响应属性，在互动过程中，见解质量高的发言会有越来越多的评价和响应。

(3) HWME 体系的构成和应用技术。HWME 采用多媒体技术、数据与知识仓库(汇集以往的和现有的知识、研讨中得到的知识、各种相关数据与信息、专业和经

验知识等，以及数据库管理系统）、模型库（汇集模型、参数、算法、事例、现场建模等，以及模型库管理系统）系统，多通道人-机交互（手写与语音输入）及信息部件等接入终端与服务器。这样就建立起一个专家位于不同地方甚至不同国家进行研讨的分布式研讨厅。

上述系统于2003年9月在维也纳的国际应用系统分析研究所（IISA）的复杂系统建模研讨会上介绍，引起各国专家很大关注：认为在解决复杂系统问题时具有较强的可操作性；进而对这一具有中国特色原创性HWME系统有了一定的认识和理解；可以说实现了支持宏观经济决策的HWME体系。

回顾自OCGS及其方法论提出，从理论创新到得到验证，进而研制出处理复杂巨系统的可操作平台。这是两代中国科学家利用整体论和还原论相结合的研究成果。在提倡可持续科学发展观的今天，可以预期，这种研讨厅操作平台将成为各项决策的科学化与民主化有力支持手段，在我国的社会主义建设中发挥日益重要的作用。

27 人-机结合综合集成的复杂信息处理[1]

27.1 从定性到定量的综合集成方法

27.1.1 综合集成法的提出

1986年，钱学森在一次讲话中谈到，软科学是定性方法与定量方法相结合的；软科学研究离不开三个要素：① 信息、情报资料，情况要搞清楚；② 为了定性到定量相结合，专家的意见非常重要，一定要有渠道搜集专家的经验和判断；③ 要定量，建立模型，在搜集资料以后，请专家讨论、提意见；然后，根据专家的意见来建立模型，上电子计算机计算；算的结果，再请专家来评审，反复进行。这个过程，就是理论与实践相结合、定性与定量相结合的过程。这一方法可称之为“定性与定量相结合的系统工程方法”。

这个方法是在社会系统、人体系统、地理系统这三个开放的复杂巨系统(OCGS)研究实践的基础上提炼、概括和抽象出来的。

“在这些研究和应用中，通常是科学理论、经验知识和专家判断力相结合，提出经验性假设(判断或猜想)；而这些经验性假设不能用严谨的科学方式加以证明，往往是定性的认识，但可以用经验性数据和资料以及几十、几百、上千个参数的模型对其确定性进行检测；而这些模型也必须建立在经验和对系统的实际理解上，经过定量计算，通过反复对比，最后形成结论；而这样的结论就是我们在现阶段认识客观事物所能达到的最佳结论，是从定性上升到定量的认识”。

27.1.2 综合集成法的基础和发展

1991年，在多次学术讨论的基础上，将定性定量相结合的综合集成法发展为“从定性到定量的综合集成法”。它强调了思维动态、辩证的性质。其中“从定性到定量”就是从感知认识到理性认识，从定性的、不全面的感性认识到综合定量的理性认识。在这一过程中，人工智能(Artificial Intelligence)和知识系统可以发挥重要作

① 戴汝为. 人-机结合综合集成的复杂信息处理. 认知过程及智能信息处理学术研讨会主题论文，2005，11

用，“法”即技术工程，是综合集成工程，综合集成工程位居思维科学（认知科学）的工程技术层次，是思维科学（认知科学）的一项应用技术。

在复杂的信息处理过程中体现了人-机结合，并凸现了它在综合集成中的关键作用。

马克思在《政治经济学批判》导言中论述政治经济学的方法时指出：“如果我从人口着手，那么，这就是关于整体的一个混沌的表象，并且通过更切近的规定我就会在分析中达到越来越简单的概念；从表象中的具体达到越来越稀薄的抽象，直到我达到一些简单的规定。于是行程又得从那里回过头来，直到我最后又回到人口，但是这回人口已不是关于整体的一个混沌的表象，而是一个具有许多规定和关系的丰富的整体了。……在第一条道路上，完整的表象蒸发为抽象的规定，在第二条道路上，抽象的规定在思维过程中导致具体的再现”。恩格斯对此给予了极高的评价。他说：“马克思对于政治经济学的批判就是以这个方法作基础的，这个方法的制定，在我们看来是一个其意义不亚于唯物主义基本观点的成果”。

按照这一做法，认识一个复杂事物的过程可以完整地表达为：

感性具体——→思维的抽象——→思维的具体

（感性认识）——→（理性认识）

这也就是说，面对着一个复杂的事物，人通过大脑，从一个模糊的表象获得一个清晰、丰富的整体，而思维的抽象与思维的具体这两个阶段是既包括抽象又包括形象思维的综合集成的过程，体现了从感性认识到理性认识的过渡。

可见，综合集成这样一种方法，前人也在用，不过那是用人脑在进行综合集成。现在，发展到信息时代，我们所提倡的综合集成可以是人与机器相结合，以人为主，人脑的信息处理与电脑的信息处理相结合。我们的先辈们在作决策时是用他们聪明的脑子，我们现在可以采用人-机结合的办法，我们把决策作得更好。这就可以说是人-机共创智慧。

如何理解从定性到定量相结合的方法，就是人根据经验，寻找合适的框架，然后用数学验证这个框架，把这一套有效结合在一起。而且人也不限于一个人，是专家集体，这就是定性与定量相结合方法的优势。从定性到定量的综合集成法实际上是：第一，综合集成定性认识达到对整体的定量认识；第二，“法”即技术工程，即综合集成工程（metasynthetic engineering）；第三，综合集成工程居思维科学的工程技术层次，创立并发展它将为思维科学的技术科学层次及基础科学层次（思维科学）提供营养。应用这个方法有三个要素：一是要有专家的意见，就是经验性的知识。专家的意见也可能有矛盾，但不要害怕，我们要尊重每一位专家从实践中做出的判断，这是第一个要素。第二个要素就是要有客观实际的数据，不能空来空往。第三个要素把这一大堆东西综合起来。因为现象是复杂的，所以不能用简单的模型，要用几百个、几千个参数的模型才行。把这三个要素结合来，反复的试验计算，最后就能够把

这三个方面真正糅在一起，成为对问题的全面认识。因此，综合集成方法的实质是，专家体系、数据与信息体系、计算机体系三者的有机结合，它本身就是一个开放的复杂巨系统。

这个方法论是把还原论与整体论结合起来，即超越了还原论也发展了整体论，是系统学的一种新的方法论。

27.2 现场认知

认知科学(cognitive science)是研究人类的认知和智力的本质和规律的前沿科学。认知科学建立起了研究认知特有的科学概念和科学方法论，从而使我们对人类的认知和智力的研究不再只是直觉的、思辨式的，哲学式的讨论，而开始建立在现代科学分析和科学实验的基础之上。

27.2.1 智慧的性智与量智

人类的智慧称为心智(mind)，是脑的精神活动的总称，包括感觉、知觉、学习、记忆、注意、情感、意志、兴趣、性格、思维等大脑活动的一切方面。人的心智对世界的把握则有演绎、归纳、类比、分析、综合、抽象、概括、联想和直觉等等多种手段，它比数学和逻辑学所描述的可能世界要复杂宽广得多。心智是一个非常复杂的问题，大致可分为两个部分：人的性智(qualitative intelligence)与人的量智(quantitative intelligence)。量智部分，通过分析，计算与推理可以培养，可以用逻辑学和数学来形式化，用目前的计算机加以模拟与实现；性智部分，由经验、社会与文艺等培养所形成，属于形象思维和创造性思维，如直觉、顿悟、灵感等，体现为创新、判断和把握全局的智慧，超出了逻辑和数学的世界，是以计算主义为基础的计算机无法完成的。



27.2.2 人造昆虫引发的问题

1991 年 8 月在澳洲悉尼举行的国际人工智能联合会议，世界上有 23 个国家的近 1 500 人参加了这次会议。在这次会议上，美国 MIT 的年轻教授布鲁克斯(R. Brooks)获得了大会授予的“计算机与思维”项目奖，他在会上做了题为“没有推理的智能”的学术报告，提出人工智能的一些新观点，与传统的看法大相径庭。他论述了计算机、机器人等的发展情况以及以自己长期从事的“人造昆虫”，即具有六条腿的像个蝗虫一样的自动装置。他以自己的实践与经验论述了 20 世纪 40 年代由维纳

(N. Wiener)创立的控制论(cybernetics)思想对人工智能的影响;其中主要之点是研制一个具有智能的系统,自然要问系统在什么样的环境中运行,也说是系统与环境是不可分的。系统的复杂性不仅仅体现在系统本身,而且也体现在环境方面。早在1952年,一位控制论专家阿希贝(R. Ashby)就认识到,并且明明白白地论述过:为了理解机体所产生的行为,一个机体和它周围的环境,必须一起构成模型,反馈分析的工具就用来集中于环境有所变化时,保持系统的稳定性。

布鲁克斯本人是一个人工智能的专家,他在1991年的人工智能杂志上还发表过“没有表示的智能”一文。他以人工昆虫的研究为例,对传统人工智能中的核心概念“表示”与“推理”提出了异议,提出人造昆虫的“包容体系结构(subsumption architecture)”。对于机器人或其他智能系统来说,周围世界必须包括在系统的模型之中。他概括了他在人工昆虫这类机器人研究中突出的四个概念:① 机器人所处的现场(situatedness):机器人处于一定的环境之中,它们不涉及抽象的描述,而是处在直接影响机器人行为的现场。② 具体化(embodiment):机器人有躯干,眼睛放在什么地方都是具体的,有直接来自周围的经验。它的作用是所有现场的动态行为的一部分。它的感官起作用后立即会有反馈。③ 智能(intelligence):机器人看起来有智能行为,智能的来源不仅仅限于计算装置,也来自周围的情景,敏感器之间的信息传送,以及机器人与周围环境的交互作用,对于智能的来源与传统的说法不大一样。④ 涌现(emergence):智能是由很多部件交互作用,与环境交互作用所产生的系统涌现出来的总的行为。

以上这些观点表明,智能行为可以在没有明显的推理系统情况下产生,智能是系统与周围环境进行交互作用所涌现出来的。布鲁克斯的工作代表了人工智能的新方向,称为“现场(Situated)人工智能”。智能系统一方面要从所运行的环境中获取信息(感知),一方面要通过自己的动作(作用)对环境施加影响,互相影响,共同进化。研制人工智能系统,不能只考虑电脑部分,还有驱体,各种敏感文件,执行机构等等,能对所运行的环境有理解的能力。

27.2.3　由现场AI到现场认知

以克兰西(W. Clancey)为代表的一些学者则认为符号理论不能解释人类的智能行为,不是像计算机的中央处理器的方式那样操作,而是一种能同时协调感知-动作的机能;智能行为是感知-动作多次循环的结果,不是深思熟虑的推理和决策;学习不是一个存储新程序的过程,而是一种能同时协调感知-动作的辩证机制;这种感知-动作的神经结构和组织过程是在运动中创造的,是通过它们的不断激活、竞争选择和重新组合,得到的是一种自组织的机制。围绕着“物理符号系统假设”,以年轻的克兰西为代表的一方与大名鼎鼎的司马贺为代表的一方展开了激烈的争论。由“物理符号系统假设”作为唯一基础的研究,转向与“环境进行交互”为主要点的“现

场认知”是新开阔的方向之一。在方法方面，则不仅仅局限于以往心理学领域中所习惯的通过被试者的“口述报告”的方法，而采用先进的技术，如功能性核磁共振成像技术(FMRI)、正电子发射成像(PET)等技术，来研究脑功能成像。利用现代高新技术为工具，进行脑功能定位的研究，从不同角度提出各种认知理论：例如克兰西以诺贝尔奖获得者爱德尔曼(G. Edelman)提出的神经达尔文理论(neural da winism)为基础，给出一种自适应神经系统的观点，对知觉的产生作了猜测。

历史的记载表明：在1984年德国科学家布莱顿贝格(Braitenberg)提出一个新的“综合心理学(Synthetic Psychology)”学科。他的思想是智能可能是从一些部件的交互作用中“涌现”出来，所说的基本部件称为“人工神经元(artificial neuron)”。此外，不仅是提出想法，他还设计了分别与“爱”、“恨”、“侵犯”等相对应的活动小车。我们可说复杂系统中的重要特性“涌现”最早是布朗顿贝格有所认识。布鲁克斯的贡献是他提出了人造昆虫的“包容体系结构”，并用有限状态自动机代替了人工神经元。

27.3 社会思维的群体智慧

27.3.1 社会思维

社会思维学是一门研究人作为集体来思维的规律，和集体思维的相互关系、相互作用的科学。社会思维学所研究的范围是人作为一个集体来思维的规律。

在改造客观世界的过程中，我们不仅要利用自身的实践，而且要利用过去人类创造出来的精神财富，其中知识是人类社会实践的一个非常重要的补充。个人是生活在社会之中的，它对于社会的集体精神财富也表现为相互作用。社会思维是指人作为一个集体来进行的思维，这里即包括了思维的社会性问题，也包含了个体思维和集体思维相互作用的问题。即任何人类个体的思维活动都与集体、社会处于相互作用之中：任何个体的思维活动都离不开社会、集体与前人的思维成果；个体的思维成果对集体、社会与他人也发生着作用。同时应该指出，人作为集体来进行的思维，这时，思维的主体不是个体，而是集体。

集体讨论是人作为集体来进行思维的一个有效的形式。在讨论集体成员之间相互对话、讨论、反驳、自省等都是激发群体和个体智慧的有效手段。集体智慧成果所形成的讨论结果或者决议，体现了人进行集体思维的过程，是实现集体思维有力的例证。

民主集中制就是社会思维的规律。在这种宏观思想的指导下，怎样使一个集体在讨论问题中能互相启发、互相激励，从而使集体远胜过一个个单独个体、不接触别人的简单综合，成为社会思维学研究的主要内容。

27.3.2　社会思维与群体智慧

从上面研究我们可以看出，社会（群体或集体）思维的提出具有客观的、历史的必然性；社会思维主要不是指个体思维的社会性，而是指群体思维或者集体思维。我们认识社会思维虽然包含思维的社会性问题，但主要不是指思维的社会性。思维的社会性是指人的思维不是孤立的，而是受前人、他人乃至社会环境、历史传统的制约，其思维主体仍然是人类个体。而社会思维的主体是群体或集体，它是人作为社会整体进行的思维活动。因此社会思维的实质是集体思维。社会思维就是根据思维主体研究是个人还是集体所划分出来的与个体思维相对应的思维形态。

社会思维可以理解为：社会中的人群集体思维。与个体思维相对，它不是个体思维的简单叠加，而是一定范围的人在按照一定的内在规律相互联系、相互影响、相互作用的基础上所形成的一种具有共同特征的社会思维。社会思维可以是团体的、群体的也可以是阶级的、民族的……现代，世界进入了新技术革命时期，智力、知识已在社会中起着决定性作用，并且各种问题越来越需要通过集体智慧才能加以解决，而社会思维学研究作为集体形式而存在的思维主体的思维规律的学科，显示了其日益重要的作用。

在群体进入这样的思维状态下，就会使思维能力大大提高，从而发挥其前所未有的水平，使思维的结果实现跨越，涌现出群体智慧，而实现这种群体智慧有赖于综合集成的科学。钱学森把社会思维学融入到从定性到定量的综合集成法，提炼出从定性到定量的综合集成研讨厅体系，为以现代科学手段贯彻民主集中制和实现群体智慧提供了方法论依据和基础。

27.4　人-机共创智慧和智能系统

27.4.1　人工智能（AI）的发展和徘徊

1956年美国的一批不同领域的科学家，包括数学家、心理学家、计算机科学家、神经生理学家在达特莫茨（Dartmouth）大学举行了一次学术会议，讨论建立一个新的学科，参加的人有明斯基（Minsky）、山侬（Shannon）、麦卡锡（McCarthy）、莫尔（Moore）、塞木尔（Samule）、塞夫伯利支（Selfridge）、司马贺（Simon）、纽厄尔（Newell）等，会上司马贺与纽厄尔建议新学科命名“复杂信息处理”。而麦卡锡建议命名为“人工智能（Artificial Intelligence，AI）”，与会者接受了后一建议。达特莫茨会议标志“人工智能”作为一个新的学科正式诞生。

对于人工智能的研究，顾名思义，是用人工的方法，或者具体地说是用计算机来复制“智能”。由于人是万物之灵，也就自然而然复制人的智能，或者说是用计算机

来模拟人的思维。我们知道人脑有两个半球,人脑的思维主要概括为逻辑思维与形象思维两种类型。早期 AI 的起源是基于心理学对经验知识研究的结果,即发现启发式知识在人类思维过程的作用。这类知识表达成逻辑形式加以利用,这是 AI 最初的模型、称为“基于逻辑的心理模型”。传统的 AI 可以概括为符号表达、逻辑推理、启发式编程,或者称之为对“深思熟虑”的思维的模拟。在达特莫茨会议以后的一段时间内取得了一些令人们关注的结果。

有些 AI 的专家甚至断言:照此趋势下去,20 世纪 80 年代将是全面实现人工智能的年代。到了公元 2000 年计算机的智能就可以超过人了。

果真如此吗,当人们进行了比较深入的工作,发现“智能的复制”所遇到的困难远远超过了原先的想象,而且如果加以反思,以逻辑为基础,用计算机“复制智能”的传统人工智能的途径是否得当。

当时有的学者把 AI 的研究途径概括为以符号处理为核心的传统方法及网络联接为主的联接机制(connetionism)方法。从模拟人的思想的角度来考虑,这是很自然的。人的两种主要思维方式是逻辑思维和形象思维(直感思维)。符号处理可以认为主要在于模拟人的逻辑思维,联接机制主要致力于模拟人的形象思维。关于形象思维虽然人们认识到它的重要性。但用现在的计算机来模拟形象思维是很困难的,需要在计算机的体系结构上有新的突破。人们对网络模型结构抱有很大希望,以往比较著名的人工神经元网络模型有哈普费尔德(Hopfield)网络,反向传播(back-propagation)网络,自适应共振理论(adaptive resonance theory)网络等。在 20 世纪 80 年代,哈普费尔德的工作及反向传播理论受到关注,许多研究人员蜂拥而至这个领域时,自适应共振理论的创建人格劳斯博格是少数几个坚持自己的工作又对建立这个领域所有帮助的人;格劳斯博格在大脑学习及人工智能方面从事了 30 多年的工作,逐渐形成一套建立在神经网络基础上的模式。这些模式似乎已能解释有关思想方面某些最不可理解的问题。

在人工智能取得一些成绩的同时,也不断的受到冲击,有人把从 20 世纪 50 年代中期到 80 年代,AI 的研究作了比喻:研究万物之灵的人,不研究整个人,而是把脑袋与身体隔离起来,只考虑脑的左半球;逻辑思维虽然能体现人的智慧,但人是靠脑袋和肢体共同协调工作,才能具有适应环境的能力,才有智慧。这一比喻在一定程度上说明了传统人工智能的局限性。

27.4.2 人机共创智慧

关于智能的研究,可以说有计算机(电脑)的智能与人的智能两个大的方面。一方面是研究用电脑来实现智能行为。人工智能便是尽可能地用机器体现或模拟人的智慧或智能行为,并且或许在这一方面最终改善人的能力。人的智能与机器智能两方面的研究很难截然分开,两者往往交叉进行共同发展。经过上述半个世纪的探

索，我国科学家开拓了这条人-机共创通向钱学森所概括的“大成智慧”的道路。

人工智能自诞生到现在，经历了50多年的风风雨雨。半个世纪以来，既有成功的快乐，又有失败的困扰。尽管如此，人工智能在许多方面所取得的进展，依然是非常引人注目的。

从技术的角度看，人工智能要解决的问题是如何使计算机表现出智能，使计算机能更灵活、更有效地为人们服务。只要计算机能体现出人类相似的智能行为，就算达到了目的，而不在乎计算机的工作过程与信息处理的方式是否与人脑在完成同一任务时的工作机制相一致。从这种观点出发，人工智能就可以解释为“使计算机去做那些原来需要人的智能才能完成的任务”。

心理学家、语言学家则倾向于将着眼点放在用计算机程序去复现人脑在完成同一任务时的内部状态上。他们强调首先要了解人脑活动的机制，认为只有在对人脑的工作机制有了足够了解的基础上，才有可能用计算机去和复现它。还有一部分则侧重于理解形成智能的原理，分析人类智能的特点，并设法在机器上予以实现。

至于人的智能，近年来美国国家基金委召开有关认知科学的会议上，把认知科学的研究概括为研究人的智能、动物智能以及机器智能的基础性科学。我国科学家把思维科学、系统科学和复杂性研究结合起来，钱学森提出“开放的复杂巨系统”，为处理这类十分复杂的系统，他还提出思维科学的一项应用技术，即“从定性到定量的综合集成法”。处理开放的复杂巨系统，有关问题，即包括智能的飞跃。实现智能飞跃用已有的方法，只靠计算机是行不通的。我们知道从定性到定量的综合集成法，其核心思想就是人脑与电脑的结合；采用综合集成法，就有可能把人的思维、知识、智慧以及各种情报、信息统统集成起来，达到集智慧之大成。

我们主张人脑与电脑的结合，强调人在未来智能系统中的作用，是对传统人工智能研究，也是对传统自动化研究目标的革命，这将带来一系列在研究方向及研究课题上的变革。从定性到定量的综合集成技术充分发挥与体现了人-机结合的思想，在综合集成的过程中人始终起着主导的作用。另外，专家在错综复杂的情况下作出的判断、提出的假设以及专家的某些“点子”，是专家经验积累而形成的知识，是人的“心智”的一种体现。可以认为，综合集成是人用计算机的软、硬件来综合专家群体的定性认识及大量专家系统所提供的结论及各种数据与信息，经过加工处理，从而使之上升为对总体的定量的认识。综合集成的过程是相当复杂的，即使掌握了大量的定性认识，也不是通过几个步骤、几次处理就能达到对全局的定量认识。因为复杂的、智能型的问题往往被称为结构不良的问题(ill structured problem)，也就是说目标、任务范围、计算机允许的操作都不具有明确的定义，需要一种有反馈的过程来加以解决。结构不良的另外一种含义是针对被解决的问题而言的，即所具有的知识是不完备或不一致的。例如对于同一个问题，两个专家的看法可能完全不同，发生了矛盾，这就必须靠人参与解决；另一方面当然也要发挥计算机快速处理的本

领，形成为人-机结合的智能系统。这样的系统，是我们追求的目标，是迄今为止可以处理复杂巨系统有关问题的最有力的工具。

27.4.3 人-机结合的智能系统

关于人机结合的智能系统的研究，在我国“863”计划“306”主题-智能计算机实施了几年后，钱学森做过如下谈话：“智能系统是非常重要的，是国家大事，关系到下一个世纪我们国家的地位。如果在这个问题上有所突破，将有深远的影响。我们要研究的问题不是智能机，而是人与机器相结合的智能系统。不能把人排除在外，应该是一个人机智能系统”。这次讲话，对人工智能，智能计算机以及其他科技领域的研究具有极其深远的指导意义。

人们对理论的掌握与推导，用系统的方法解决问题的能力都属于量智，是逻辑思维的体现。分析现在的电脑的体系结构；用电脑对量智进行模拟是有效的。人工智能的研究表明了模拟逻辑思维，可以取得成功；但是用现在的电脑模拟形象思维基本上是行不通的。总而言之，明智的方法是人脑与电脑相结合；性智由人来创造与实现，而与量智有关的则由电脑来实现，这样是合理而又有实效的途径。从体系上讲，人作为一个成员，综合到整个系统中去，利用并发挥人类和计算机各自的长处，把人和计算机结合起来形成新的体系。强调人在未来智能系统中的作用，是对传统人工智能研究，也是对传统自动化研究目标的革命，这将带来一系列在研究方向及研究课题上的变革和深化。

27.5 基于智能信息处理的综合集成研讨厅体系

作为思维科学(认知科学)的一项应用技术，它把专家的智慧、计算机的智能和各种数据、信息有机的结合起来，把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来，构成一个统一的、人-机结合的巨型智能系统和问题求解系统。这个方法论的成功应用在于发挥该系统的整体优势和综合优势。其核心在于人的心智与机器高性能的取长补短、综合集成。

27.5.1 基于 cyberspace 的综合集成研讨厅

在综合集成研讨厅的概念中，“厅(Hall)”的含义在于：研讨厅是专家们同计算机和信息资料情报系统一起工作的“厅”，是把专家们和知识库、信息系统、人工智能系统、高速计算机等像作战指挥厅那样组织起来，形成巨型的人-机结合的智能系统。其最初的构思类似综合了上述系统的会议厅。

随着 Internet 和网络的迅速普及，深入人们工作和生活的每一个层面，“cyberspace(电子空间或数字空间)”成为一个重要的概念，它使参与者跨越时间和地域的

限制，随时随地就所关心的问题进行研究、交流和探讨，并可随时利用网络上的大量资源，无论是本地的，还是远程的。信息技术的这个发展，为综合集成研讨厅的实现提供了一种新的、可能的形式，是对传统"厅"的一种扩展。因此，可建立基于 cyberspace 的综合集成研讨厅，即 cyberspace for workshop of metasynthetic engineering。

钱学森预见到这种空间的扩展，他指出："有关老词是 noosphere（思维圈），新词的 virtual reality 似宜仍用'灵境'；而 cyberspace 是人-机结合的思维思想活动世界，似可称为'智慧大世界'，简称'智界'"。

从 HWME 到 CWME 是信息社会条件下，对 HWME 的一种具体化，一方面意味着信息技术尤其是网络技术的飞速发展，为实现这一人-机结合的巨型智能系统和工作空间提供了可能。另一方面，也说明，要建立实际可用的研讨厅系统，切实可行的方案是充分利用信息技术的成果，构建一个分布式系统。

27.5.2 CWME 的体系结构

综合集成研讨厅体系可以视为一个由专家体系、机器体系、知识体系三者共同构成的一个虚拟工作空间，如图 27-1 所示。一方面专家的心智、经验、形象思维能力及由专家群体互相交流、学习而涌现出来的群体智慧在解决复杂问题中起着主导

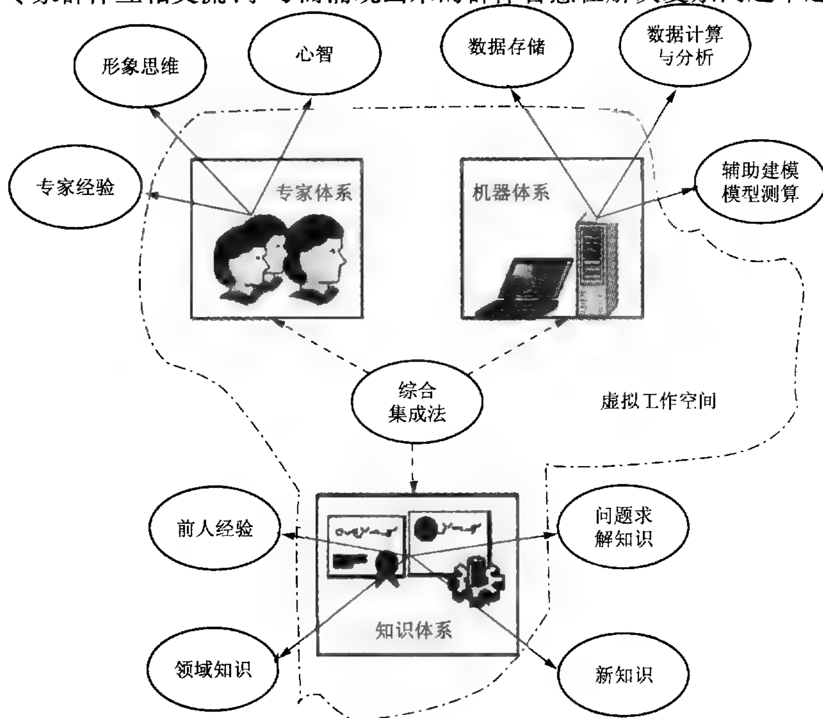


图 27-1　CWME 框架结构

作用，另一方面机器体系的数据存储、分析、计算以及辅助建模、模型测算等功能是对人心智的一种补充，在问题求解中也起着重要作用，知识体系则可以集成不在场的专家以及前人的经验知识、相关的领域知识、有关问题求解的知识等，还可以是由这些现有知识经过提炼和演化，形成新的知识，使得研讨厅成为知识的生产和服务体系。具体来说：

(1) 专家体系由参与研讨的专家组成，它是研讨厅的主体，是复杂问题求解任务的主要承担者，其中主持人的作用尤为重要。专家体系作用的发挥主要体现在各个专家“心智”的运用上，尤其是其中的“性智”，是计算机所不具备的，但是问题求解的关键所在。

(2) 机器体系由专家所使用的计算机软硬件以及为整个专家群体提供各种服务的服务器组成，机器体系的作用在于它高性能的计算能力，包括数据运算和逻辑运算能力，它在定量分析阶段发挥重要作用。

(3) 知识/信息体系则由各种形式的信息和知识组成，它包括与问题相关的领域知识/信息，问题求解知识/信息等，专家体系和机器体系是这些信息和知识的载体。

综合集成法把这三个部分组合成为一个整体，形成一个统一的、人-机结合的巨型智能系统和问题求解系统。综合集成研讨厅的成功应用就是要发挥这个系统的整体优势和综合优势。因此，要讨论综合集成研讨厅体系的实现问题，需要逐个考虑这三个体系的实现问题。其中：

(1) 专家体系的建设涉及到专家群体的角色划分问题，专家群体不良思维模式的预防及纠正，专家个体之间的有效交互方式，研讨过程的组织形式问题，等等。

(2) 机器体系的建设涉及到基本系统(包括软、硬件)框架的设计，功能模块和软件模块的分析与综合，软件系统开发方法的选择等问题。

(3) 知识/信息体系的建设则涉及到知识——尤其是定性知识和非结构化知识的表达与抽取问题，知识的共享、重用和管理问题，信息的获取和推荐问题，等等。

与此相适应，作为可操作的平台，CWME 的实际结构与所提供的功能包括三个中心、七种服务(见图 27-2)。

其中研讨中心为研讨厅中的专家提供接入服务和研讨服务，包括输入/输出方式，多媒体会议，资源共享等；信息协作中心为专家提供信息协作服务，包括信息的获取、筛选、过滤等；数据中心为专家提供专业资源服务和决策支持服务，系统管理服务和系统支持服务是为系统管理员提供的系统管理、资源调配接口。系统的整个结构以及研讨中心和信息协作中心是与问题无关的。面向不同问题时，只需要更改数据中心的内容，因而整个系统可视为一个通用的平台。

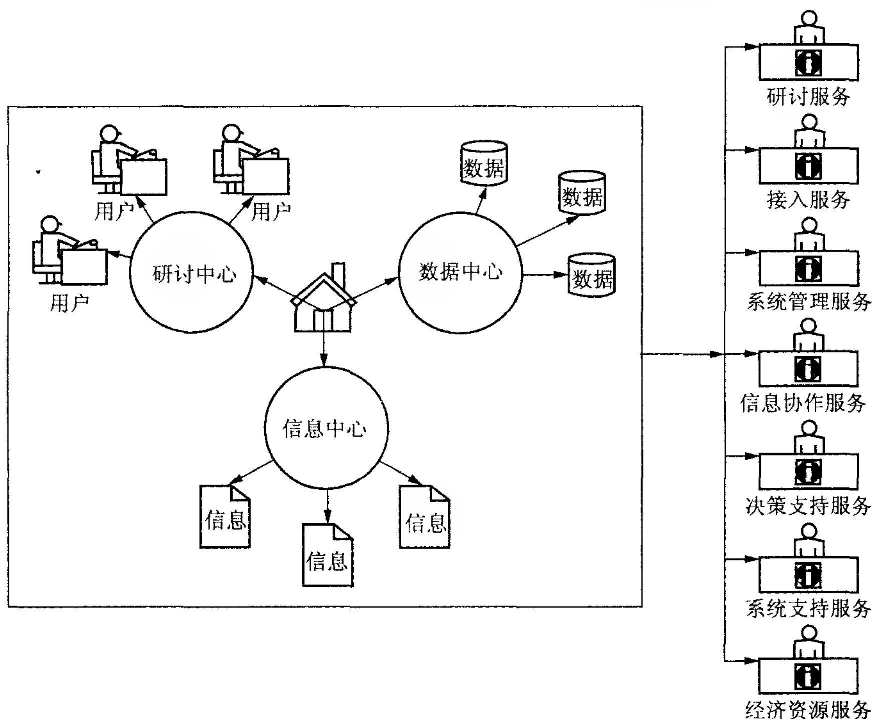


图 27-2　CWME 体系结构

27.5.3　CWME 的软件系统

图 27-3 为 CWME 软件系统的结构。它包括以下几个主要部分：

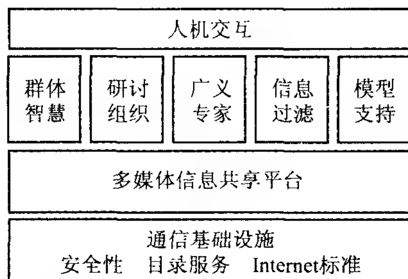


图 27 3　CWME 软件系统结构

（1）通信基础设施。研讨厅内部以及与外部通信的软硬件设施，包括物理网络，底层网络协议，以及构建于其上的一些基本通信服务，如安全管理、目录服务等。该模块可利用现有的通信设施（如局域网、Intranet、Internet 等）和通信协议（如 TCP/IP、HTTP 等），然后，根据具体要求，在应用层上添加一些必要的模块，如流媒体传输、身份认证等。

(2) 多媒体信息共享平台。为研讨厅内专家之间的资源共享提供支持,如文本/音频/视频数据的压缩与传送,文件共享,应用程序共享,计算机的互操作等。它是专家之间讨论、交流的基础平台,研讨中心直接建立在该平台之上。

(3) 研讨服务平台,该平台包括多个子模块,例如:

a. 群体智慧的涌现及可视化模块,该模块以研讨厅的序列有向属性图模型为基础,采用超链接引导的主题搜索算法(HITS),分析专家发言之间的响应关系,发现、并用图形的方式展示专家群体智慧涌现的过程。

b. 研讨组织模块,为主持人引导、规范、组织讨论过程以及专家之间的交互提供支持,其功能包括研讨秩序的维持,研讨流程的设定、转换与控制,专家群体的有效互动对话规范和防止群体思维过度发散等,其根本目的在于促进专家之间的互相激发,集思广益,消除不必要的隔阂,创造良好的讨论氛围,促进问题的深入讨论。

c. 广义专家,万维网(WWW)汇集了人类有史以来所能利用和创建的海量信息、知识,它本身构成了一个开放的复杂巨系统,具有深刻的内部结构。WWW中面向特定问题的权威网页可以看作是某些特殊"专家"针对该问题的观点,这些权威网页是WWW经过自组织"推荐"出来的,是数以百万计的网民群体智慧的体现。这些特殊"专家"与研讨厅内的人类专家组成广义专家群体,彼此可以交互,这样就使得研讨厅讨论的成果不仅仅是若干个人类专家智慧的集结,而且包含了成千上万的网民智慧。

d. 信息过滤模块,研讨厅的专家来自于与复杂问题相关的多个领域,每个人研究的重点不同,需要不同的相关信息。WWW上丰富的信息资源为信息获取带来的极大的便利,但同时,信息的爆炸性增长,使得通过一般搜索技术得到的大部分信息是无用的。信息过滤模块则利用兴趣相似的专家之间的"推荐"作用,采用协作过滤的方法,通过提供个性化的建议来克服信息过载问题。

e. 模型支持模块,这里的模型支持模块并非针对具体的模型,而是指现有模型的可视化组合与重用。对于一些现有的、同类型的模型可以使用该模块进行集成,通过简单的鼠标拖放操作,将多个局部模型与全局模型相连,形成一个整体模型。不同模型间的输入/输出连接、权值可以在交互界面中进行调整,同时触发各个模型的重新计算,实现模型重组的"所见即所得"。

f. 人机交互,提供人机界面,是专家进行研讨、检索、建模等所有工作的前端模块,提供发言文本/音频/视频/电子白板等输入、输出工具,共享资源的使用工具,计算机互操作工具,建模、模型运算结果的显示,群体智慧涌现过程的可视化显示,意见分析的可视化显示等。它是研讨厅专家的"研讨终端",是专家参与研讨的前端平台。

27.5.4　CWME 的功能特色

CWME 的特色表现在：

（1）人机结合，以人为主。人在该系统中始终起指导作用，让使用者回归到了现实社会中的人和人的沟通、交流当中。

（2）面向网络。提供了目前最可靠的和易用的基于 Web 的协同工作平台，适合有广泛交流沟通需求的一切企业、机关、研究单位等。

（3）多种形式的资源共享以及计算机之间的互操作，有利于将存在于专家大脑里的知识以可视化的方式进行共享，同时减少了软件集成的设计工作和服务器的负担。

（4）实时跨平台协作，从 Windows 延伸到 Mac、Unix 和 Linux，做到研讨厅无处不在。

（5）多媒体接口设计，充分使用即时语音交流、手写汉字识别、指纹识别（用于身份认证）、视频会议等多媒体手段。

（6）结合知识管理，体现了研讨厅是一个知识的生产与服务体系，实现了民主集中的工作空间。

CWME 客户端的运行界面如图 27-4 所示。

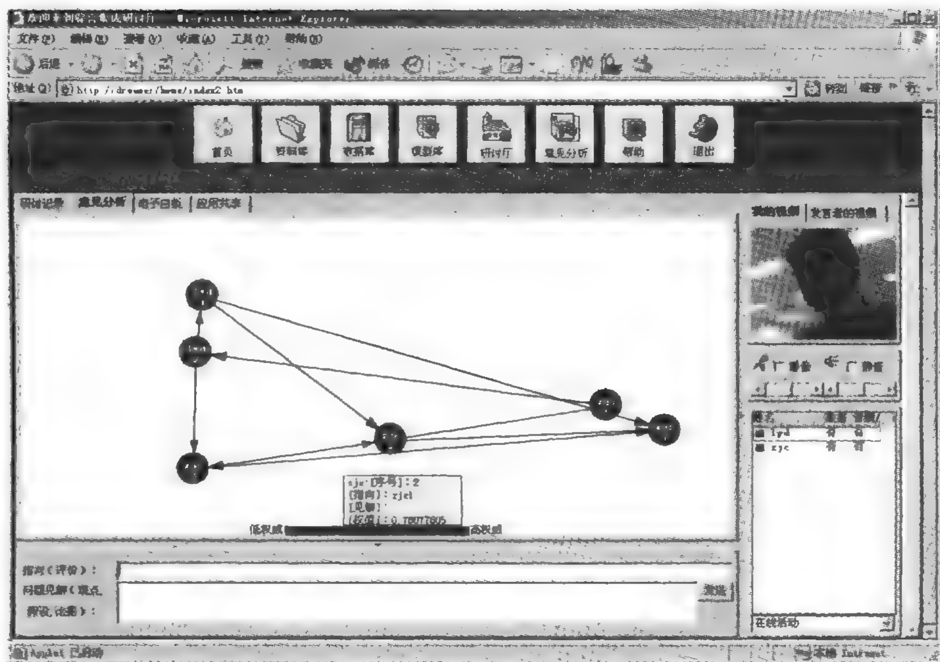


图 27-4　CWME 客户端的运行界面

27.6 小结

“综合集成方法”从认知科学研究人的智慧出发，构建基于智能技术的综合集成研讨厅体系。它把人的智慧、机器的智能和古往今来涵盖各方面的知识信息加以综合，集成起来。既体现了认知科学、思维科学有关方面的一些智能研究和人-机结合的成果；也建成了利用计算机、信息网络等各方面技术成就的操作平台，在一定程度上实现了“智慧涌现”。总之，综合集成法成为有效的复杂信息处理的基础；基于智能信息处理的综合集成研讨厅体系及其应用是我国原创科学思想经两代科学家辛勤耕耘的成果。

28　从思维科学到社会智能科学[①]

"控制论(Cyberentics)"在20世纪40年代问世以后，钱学森有过如下的预言："可以预料，从某种意义上说，本世纪末(20世纪)到下一个世纪，将是一个交叉学科的时代"。当今科学的发展正在实践着这个预言！多学科的交叉与融合不断涌现：如复杂性科学、复杂巨系统科学以及本书所论述的社会智能科学，都是多学科交叉发展所形成的结果。

社会智能科学源于思维科学，是人类智慧社会性日益呈现，应用综合集成方法论，及与当前信息技术网络空间和机器智能共同发展而形成的学科。它的形成是基于三个方面。

28.1　以思维科学为基础的人类智慧的发展

(1) 对于人类的个体而言，擅长于形象思维、易形成为象智，象智与量智相结合形成高层次的性智，而性智是大成智慧的来源[②]。现在应予重视的是作为个体与其运行的环境(自然环境、社会环境，简称"情境")，即个体与情境相联系的智慧以及学习对智慧形成的作用等。

(2) 对于人类的群体而言，综合个体的智慧着重与情境相联系所产生并通过多层次的学习所丰富了的群体智慧等。

(3) 对于人类的社会而言，社会思维激发群体智慧的涌现，在一定社会环境下形成与此相联系的社会智能。

概言之，个人与其所处的环境所呈现出来的智慧，群体与环境交互所涌现出来的智能；人的智慧与所处的环境不可分割，进一步如果上升到人类社会，那么也必然要研究社会思维以及与其紧密相联系的社会智能了。总之，应加深对思维科学的基础研究，并与智能模拟的技术实践相联系，才是社会智能科学研究的道路。

---

① 戴汝为. 从思维科学到社会智能科学——《社会智能科学》前言，2006

② 钱学森致戴汝为信件，1993年1月25日

28.2 科学的方法论

从学科交叉的观点进一步发展"综合集成研讨厅体系"作为研究社会智能科学的方法论。当前"综合集成法"和"综合集成研讨厅体系"是处理 OCGS 的方法；而 OCGS 包括人脑系统、人体系统、以及 Internet、数字城市、社会经济系统等；这类系统的特点就是涉及"人"，和包括人与人的群体，并以此作为系统中的基本单元。OCGS 的提出及其与社会智能科学的沟通，成为人文科学与自然科学交融的开篇之一。

28.3 利用信息技术与机器智能的新成果及开发工具

AI 的发展过程已经历了既令人兴奋、反思，又开辟蹊径的阶段；将不断有一些新的成就及新的开发工具问世。用计算机作为工具，研究智能模拟的技术，以计算机进行模拟，可以进一步发展人工智能的新技术等，以之作为社会智能科学行之有效的手段，事半功倍。

人工智能研究的历史启示我们，以人类的智慧与计算机模拟的人工智能两者互补，可以形成一门新的科学技术部门。

学科交叉的特点就是及时能够在不同的学术领域之间进行沟通，互相借鉴，取长补短，从而酝酿和发展出新兴的科学领域。

20 个世纪 90 年代，我国的科学工作者在建立系统科学的基础层次——"开放的复杂巨系统"的过程中，提出"从定性到定量的综合集成法"，是处理"开放的复杂巨系统"的方法论，进一步构成"综合集成研讨厅体系"；把专家群体、知识信息系统、和计算机系统组织成为巨型的智能系统，服务于不同的领域。这就不仅可以为经济建设、社会发展、科技事业、军事对抗等提供科学决策和可接受的选择；而且对社会思维、群体智慧、机器智能和知识体系综合运用，对网络技术、信息技术、软件技术进行了集成开发，使研讨厅向多维信息空间，即"智界"[①]发展。同时，在思维科学的基础上，有了理论指导、加深了具体的认识，从而把握了思维—智慧—群体智慧进而表现为社会智能的进程，使之在现代技术科学体系中添加了一门时代的新军。

作为一门新兴的科学，社会智能科学在理论层次上还有待研究和完善，大成智慧学及社会思维学是其研究的基础；技术科学层次可以认为是"综合集成研讨厅体系"及"综合集成复杂的信息处理"理论；而大成智慧工程和日益丰富的人-机结合智能系统在发挥着应用层次、工程实例的作用。

---

① 钱学森致戴汝为信件，1995 年 2 月 2 日

从思维科学、信息科学与技术、和时代网络技术相结合的“智能科学”，到进而体现出人文科学与自然科学相互交叉与融合的“社会智能科学”，这一历程中浸透着钱学森的前瞻性的科学思想与博大精深的智慧！

谨以此书献给钱学森，以感谢他对本书作者多年来在科研方面的教导！